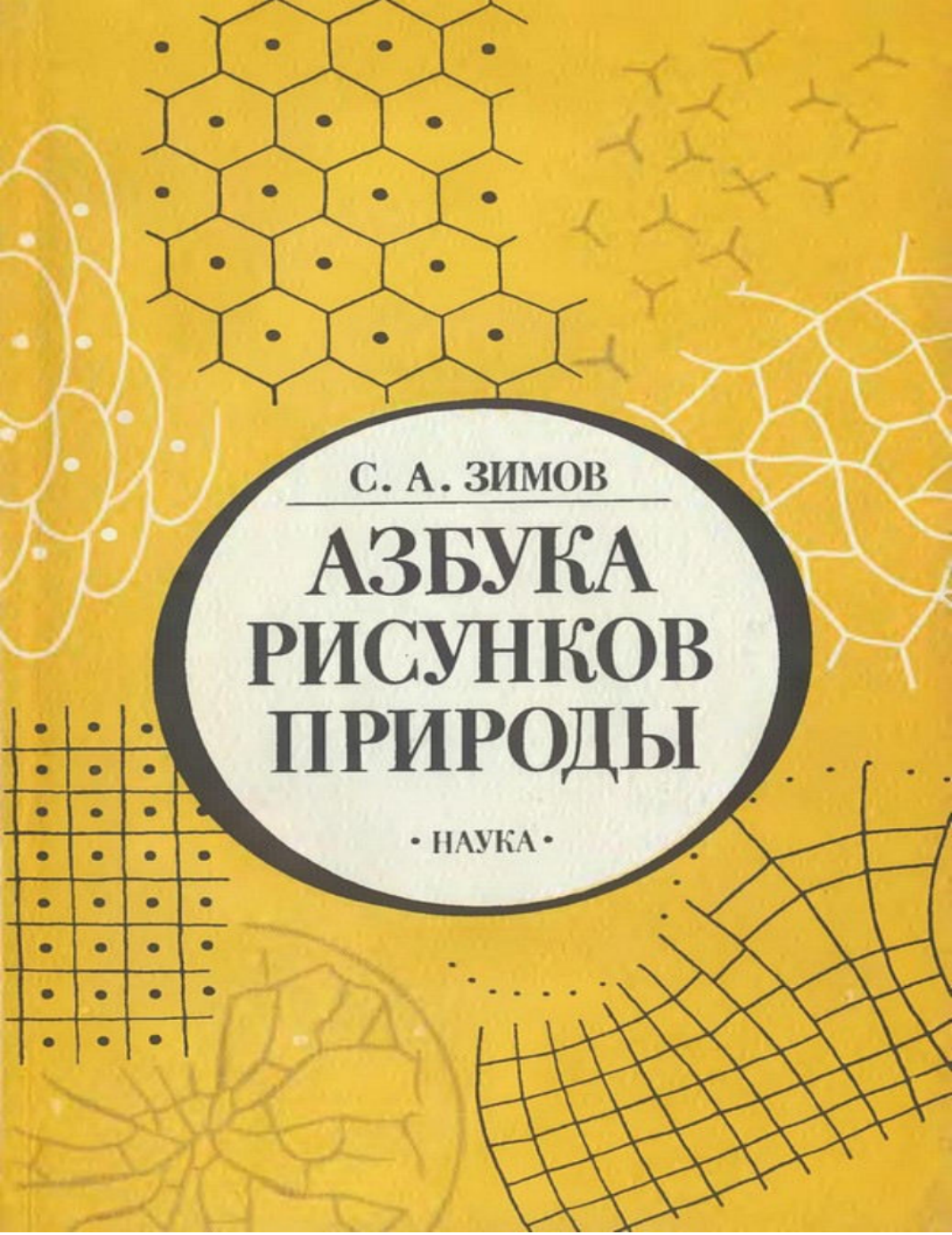

С. А. ЗИМОВ
АЗБУКА РИСУНКОВ ПРИРОДЫ
• НАУКА •

SHOUT
SHARE
IT

Annotation

Почему сетка трещин похожа на сеть городских улиц, а прожилки зеленого листа на речную систему? Как возникает ячеистый рисунок на шкуре жирафа и почему он похож на конвективные ячейки? Есть ли у природы универсальный принцип, обеспечивающий появление упорядоченных форм? Если Вы хотите узнать ответы на эти вопросы, увидеть шедевры природной графики, научиться понимать язык рисунков и конструировать пространственные структуры, если Вам интересна проблема «порядок из хаоса», прочтите эту книгу.

Для широкого круга читателей.

- С. А. Зимов
  -
  - Мир рисунков
  - Шедевр природы и ошибка в учебнике
  - Реки, озера и другие художники Севера
  - Кто последний? Я за вами!
  - От конкретного к абстрактному
  - Орнамент из точек
  - Порядок в лесу
  - Параллельные и расходящиеся
  - Прямоугольные решетки
  - Куда пойти в изотропном поле?
  - Паутины трещин
  - Рисунки на сковороде
  - Дороги, которые мы выбираем
  - Каждый охотник желает знать
  - Живые рисунки
  - Невидимые структуры
  - Порядок из хаоса?
- notes
  - 1
  - 2
  - 3
  - 4
  - 5
  - 6

С. А. Зимов
Азбука рисунков природы

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Ответственный редактор кандидат физико-математических наук В. И. Чупрынин

Мир рисунков

В научно-популярных журналах есть рубрика «Найдите закономерности в этих рисунках». Поиск закономерностей в рисунках природы — занятие не менее увлекательное. Они есть и на монументальных полотнах и в миниатюрах. Присмотритесь к космическим снимкам Земли, и среди облаков Вы увидите или ячеистый покров, похожий на запечатанные пчелиные соты, или параллельные гряды, или спираль циклона.

Не сразу, но и среди хаоса рельефа, хаоса горных вершин и хребтов Вы найдете упорядоченность — громадные параллельные горные складки, которые как нарезной батон расчерчены стекающими с них параллельными водотоками. Порядок можно увидеть в цепочках островов и вулканов, в параллельных побережьям полосах рифов. Порядок Вы увидите и на поверхности песчинки, и на крыле комара. Куда бы мы ни бросили взгляд, везде увидим рисунки. Они всегда перед нами. Поднесите руку к глазам, осмотрите ее со всех сторон и Вы увидите и полосы, и сетки, и спирали.

Стремление к порядку присуще человеку. Мы всегда обратим внимание на строгий рисунок, созданный ветром и волнами на песке, на базальтовую мостовую гигантов. Мы копируем порядок, увиденный в природе, и создаем новый, украшаем себя, утварь и жилища орнаментами, размечаем громадные территории прямоугольниками полей и жилых кварталов.

Как появляются все эти рисунки? Например, узор на Вашем свитере или полосы на костюме? Это понятно. А полосы на шкуре зебры или ячеистая сеть на шкуре жирафа?

Каждый рисунок кому-то интересен. Вашей рукой может заинтересоваться хиромант или криминалист. Кому-то интересен рисунок кофейной гущи на стенках и дне перевернутой чашки. Охотник распутывает цепочки следов на снегу. Геоморфолог изучает рисунок рельефа — сплетение линий тальвегов долин, водоразделов. Сеть разломов в земной коре изучают геологи. А объект экономикогеографов — опорный каркас территорий — города, поселения, соединенные транспортными магистралями. Рисунок — наиболее емкий источник информации об объекте (лучше один раз увидеть...), а иногда и единственный. Например, о процессах на Венере или спутниках Юпитера мы можем судить лишь по рисункам на их фотографиях, а замысловатые орнаменты следов на дне древних морей — это все, что осталось от многих вымерших организмов.

Если мы знаем закономерности формирования природного

рисунка, то, глядя на него, мы можем восстановить условия, при которых он образовался, охарактеризовать генерирующие процессы или дать прогноз: какой рисунок возникнет при той или иной ситуации. Чем выше упорядоченность структуры, чем более она закономерна, тем легче, достовернее и подробнее можно при ее анализе охарактеризовать породившее ее явление, восстановить ее происхождение. Отсутствие же упорядоченности говорит лишь об одном — «это хаос».

У каждой науки свои объекты, свои рисунки, везде своя специфика. Но почему мы часто видим одинаковые рисунки? Например, рисунок прожилок зеленого листа похож на рисунок речной сети, а паутина радиально-концентрических трещин на стекле автомобиля или сеть разломов в земной коре похожа на рисунок улиц Москвы. Почему рисунок пчелиных сот мы видим и на поверхности подогреваемого снизу слоя вязкой жидкости, и на покрытой трещинами глиняной поверхности пустынного такыра?

Вероятно, процесс формирования упорядоченных рисунков подчиняется каким-то общим законам. А так как большинство природных рисунков несложны и скорее даже примитивны (это пространственный ритм, параллельные полосы, сети, спирали), то можно предположить, что и законы их формирования просты. Что же это за законы? Все загадочное привлекает внимание. Наверно поэтому сегодня проблема появления упорядоченных структур — одна из самых модных. Почти в каждом номере журнала «В мире науки» (Scientific American) можно найти статью, посвященную рисункам.

Воспользовавшись такими ключевыми словами, как «синергетика», «диссипативные структуры», «фрактал», читатель наверняка найдет литературу, необходимую для ознакомления с достижениями в этом вопросе. Мы же попытаемся разобраться в законах упорядоченного рисунка без формул и компьютера, опираясь лишь на багаж школьных знаний и пространственное, образное мышление[1]. И только в конце вспомним законы термодинамики. Они говорят, что любые изменения в системе неизбежно увеличивают хаос или в самой системе, или в ее окружении. Все процессы направлены в сторону увеличения хаоса. Но, с другой стороны, мы видим, как среди хаоса возникает порядок, как среди однородности появляются структуры. «Порядок из хаоса!» — это лозунг синергетики. Но так ли это?

А начнем мы с одного конкретного примера природного рисунка. Он покажет очень важную общую закономерность. Затем от этого сложного объекта мы перейдем к простым примерам. Они помогут от конкретных явлений перейти к простейшим абстрактным рисункам. Это будут азы нашей азбуки. После этого

мы вновь вернемся к конкретным рисункам. А потом попытаемся по слогам прочитать некоторые рисунки.

Шедевр природы и ошибка в учебнике

Крайний Север — это богатейший вернисаж природных рисунков. Вершины больших округлых гор здесь многократно опоясаны кольцами и дугами нагорных террас. А если гора поменьше, то от ее вершины густым веером во все стороны расходятся полосы деллей[2], а у подножия горы они вновь сходятся в ложбинах водотоков. На многих склонах можно наблюдать, как при медленном сползании рыхлого чехла поперек склона формируются полосчатые орнаменты из гряд и натеков солифлюкционных террас.

Рисунки на Севере можно найти и на ровном месте. Если грунты щебнисты, то поверхность покрыта ячеистой сеткой каменных многоугольников, а если суглинистые — то мозаикой голых пятен-медальонов. И, конечно, поражают рисунки морозобойных решеток, сплошь покрывающие речные поймы и озерные берега и террасы. Многообразие, тщательность исполнения, громадная площадь полотен — это действительно шедевр косной природы. Здесь можно увидеть и хаотичный рисунок «разбитой тарелки», и «пчелиные соты». Но особенно впечатляют похожие на рисовые чеки строгие решетки прямоугольных (тетрагональных) полигонов, повторяющие очертания речных излучин. У берегов больших рек они непрерывно простираются на многие сотни метров.

Морозобойные структуры возникают в результате следующих процессов. Зимой при охлаждении верхних горизонтов грунтов они стремятся сократить свой объем, но в условиях протяженных массивов сжатие по горизонтали верхних горизонтов невозможно, поэтому в них появляются горизонтальные растягивающие напряжения. Как только они достигают величины, равной прочности грунтов на разрыв, образуются протяженные поверхностные трещины. В глубину они обычно проникают не более чем на несколько метров, так как на этой глубине значительные сезонные температурные напряжения отсутствуют. Ширина трещины обычно — несколько миллиметров, и она плохо заметна. Но со временем рисунок, составленный из этих трещин, становится хорошо виден. Происходит это потому, что в раскрытую трещину весной затекает и замерзает вода. Таким путем формируется узкая ледяная жилка — трещина «залечивается». Но следующей зимой грунты трескаются вновь, причем новые трещины проходят обычно по тем же ослабленным

предыдущими трещинами местам. В результате за сотни лет из множества элементарных жилок формируются широкие (до нескольких метров) ледяные жилы. При своем росте они раздвигают вмещающие грунты. Из-за этого на поверхности над жилой образуются канавки, обрамленные валиками отжатого жилой грунта (рис. 1). Благодаря этим валикам полигональный рельеф хорошо заметен даже на высотных аэрофотоснимках. Часто внутри полигонов между валиками застаивается вода, и тогда сходство с рисовыми чеками полное, единственное отличие — в них растет не рис, а пушица.

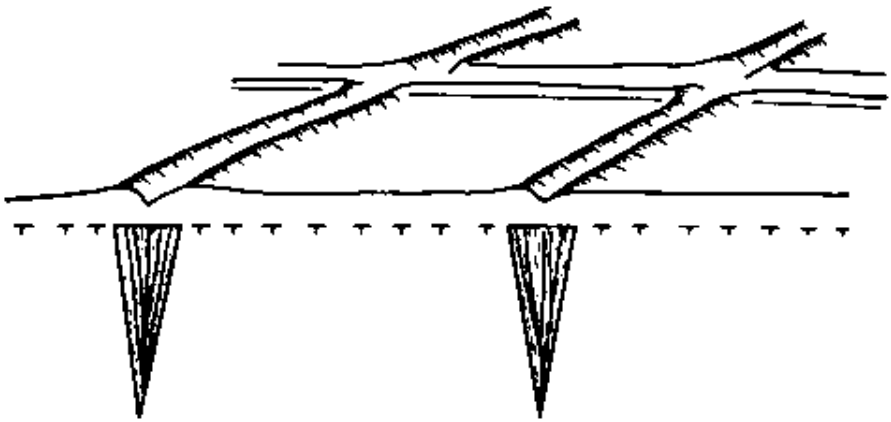


Рис. 1

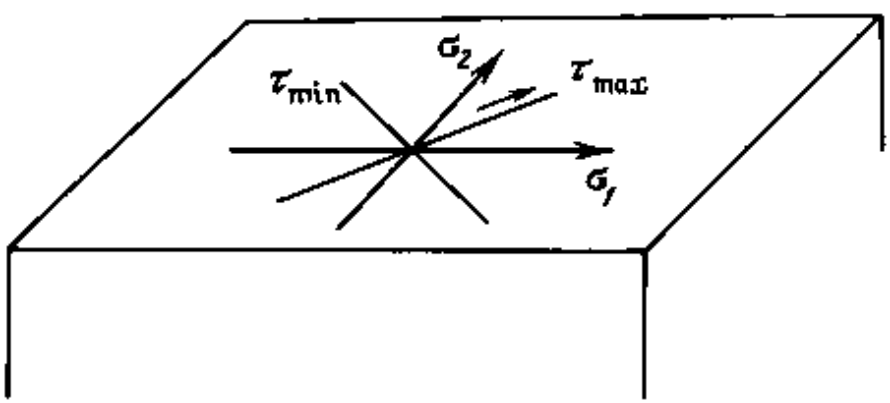


Рис. 2

Мы изложили суть механизма образования структурных элементов полигональной сети. Здесь вроде бы все понятно.

А теперь перейдем к механизму образования из этих линий рисунка — полигональной морозобойной решетки. Теория механики разрушения очень сложная. Она оперирует девятью пространственными составляющими напряжений и деформаций (это тензоры). При разрушении материала могут одновременно

образоваться как трещины отрыва, так и трещины сдвига, образующиеся под действием касательных напряжений. Но при анализе морозобойного растрескивания поверхности ситуацию можно существенно упростить. Максимальные напряжения и соответственно трещины возникают у поверхности, так как она охлаждается в наибольшей степени. Свободная поверхность разгружает напряжения в перпендикулярном себе направлении, поэтому ситуацию можно рассматривать как двумерную, приравняв вертикальные компоненты нулю. В этом случае, как известно, максимальное касательное напряжение равно

$T_{max} = \pm(\sigma_1 - \sigma_2)/2$,

где σ_1 и σ_2 — главные нормальные напряжения (они ориентированы взаимно-перпендикулярно). Максимальное касательное напряжение ориентировано под углом 45° к направлениям главных нормальных напряжений (рис. 2).

В однородном по составу и равномерно охлаждаемом плоском массиве во всех точках на поверхности и во всех направлениях растягивающие напряжения одинаковы ($\sigma_1 = \sigma_2$), при этом, как видно из формулы, $T_{max} = 0$, т. е. деформации сдвига невозможны. При неоднородных условиях в каком-то направлении напряжения преобладают — поле напряжений анизотропно ($\sigma_1 > \sigma_2$). Но при охлаждении массива главные нормальные напряжения одинаковы по знаку и сравнимы по величине — во всех направлениях растяжение. Поэтому касательные напряжения всегда меньше растягивающих, т. е. и в этом случае деформации сдвига не возникнут, будут только разрывные нарушения. Это существенно упрощает задачу анализа механизма формирования сети морозобойных трещин в отличие, скажем, от тектонических деформаций, где зачастую сдвиги преобладают.

В соответствии с механикой разрушения развитие морозобойных трещин на поверхности и их взаимодействие должны определяться следующими общими закономерностями.

1. Трещина возникает при достижении напряжениями величины, равной прочности среды на разрыв.

2. При однородной прочности материала возникает она и в последующем сечет массив в направлении, перпендикулярном направлению максимальных растягивающих напряжений.

3. За счет концентрации напряжений в вершине трещины она может в дальнейшем проникать и развиваться в массиве, напряжения в котором меньше, чем прочность грунтов на разрыв.

4. При образовании трещины в окружающей ее полосе происходит разгрузка напряжений. Чем глубже трещина, тем в более широкой от нее полосе происходит их разгрузка.

5. Вблизи трещины (у ее вертикальной стенки) напряжения в направлении, перпендикулярном трещине, разгружаются полностью, а в параллельном направлении — частично. Из этого следует, что в непосредственной близости от первоначальной образование параллельной ей трещины невозможно, но возможность перпендикулярной не исключается.

Как будет показано в дальнейшем, рассмотренные положения механики разрушений достаточны, чтобы объяснить образование морозобойных решеток. С этими закономерностями мы постоянно сталкиваемся в жизни — «где тонко, там и рвется». Каждое из них, наверно, не требует специального более подробного объяснения. Все на первый взгляд не представляется сложным. Однако это впечатление обманчиво, и в существующих представлениях о возникновении морозобойных рисунков, как будет показано, есть важные неучтенные моменты.

Откроем учебник мерзлотоведения или геокриологии (любое издание) и ознакомимся с широкоизвестной теорией морозобойного растрескивания Б. Н. Достовалова. Эта теория начинается с вывода формулы, описывающей напряжения, возникающие в верхнем слое мерзлой толщи при ее охлаждении при наличии трещины. При выводе формулы Б. Н. Достоваловым рассматривалась модель, представляющая собой однородный ограниченный с одного края вертикальной поверхностью брусок толщиной h, лежащий на жесткой недеформируемой поверхности и жестко к ней прикрепленный. Брусок равномерно охлажден с поверхности, при этом перепад температуры внутри него по вертикали изменяется по линейному закону — на поверхности изменение температуры равно Δt, а у основания — нулю. В бруске из-за охлаждения возникают растягивающие напряжения. Верхняя часть бруска у края (у трещины) сжимается, и его вертикальная стенка при этом отклоняется на некоторую величину — верхний край бруска сдвигается. Требуется рассчитать, как изменяются растягивающие напряжения при удалении от края бруска (от трещины). Для этого на каком-либо произвольном расстоянии x от края бруска мысленно отсекалась его часть. При этом новая вертикальная стенка также отклоняется на некоторую величину S. В итоге верхняя часть отсеченного бруска становится короче на величину $2S$. Далее приводится формула, показывающая, насколько при охлаждении сократится отсеченный отрезок бруска в случае, если бы он свободно, без трения, лежал на поверхности $B = \alpha \Delta t x$, где α — коэффициент линейного температурного расширения. После этого приводится зависимость, показывающая, какие касательные усилия необходимо приложить к верхней поверхности бруска, чтобы при условии жесткого закрепления

бруска к основанию она сдвинулась относительно нижней на величину S:

$S = hT_x/G$,

где T_x — касательные напряжения, приложенные к поверхности; G — модуль упругости при сдвиге. Эта формула — закон Гука для сдвига. После этого обе эти зависимости приравниваются: $B = 2S$ (?). Причем без особых оговорок касательные напряжения заменяются на растягивающие: $T_x = \sigma_x$ (?). В результате получается формула для расчета растягивающих температурных напряжений на любом удалении от трещины:

$\sigma_x = n\alpha G x\, \Delta t/2h$,

где x — расстояние от края бруска (от трещины); $\Delta t/h$ — учитывая линейный закон распределения температуры — ее средний градиент по вертикали; n — поправочный коэффициент, который, как считает Б. Н. Достовалов, равен 1/2. После этого оговаривается, что если в эту формулу вместо σ_x подставить критическое напряжение, напряжение, при котором происходит разрыв массива, то можно рассчитать, на каком расстоянии (x) от первой трещины появится вторая.

В соответствии с этой формулой, по теории Б. Н. Достовалова, в однородных грунтах полигональная решетка формируется следующим образом. При равномерном охлаждении с поверхности протяженного однородного массива, как только напряжения достигают прочности грунтов на разрыв, образуется трещина и массив разбивается ею на две части. В окружении трещины происходит разгрузка напряжений. С удалением от нее их величина возрастает, и на каком-то расстоянии на границе зоны разгрузки они равны исходным — равны прочности грунтов на разрыв. Далее следуют важные моменты. Мы их процитируем: «При однородности материала расстояния от первой трещины, на которых напряжения достигают предельных значений, будут одинаковы и, следовательно, вторая трещина пойдет параллельно первой. Таким образом, свободная вертикальная поверхность предопределяет направление следующих трещин, и поверхность однородного массива разбивается параллельными трещинами на ряд полос одинаковой толщины»[3]. Это закон параллельности. В природе (по теории Б. Н. Достовалова) роль первой направляющей морозобойной трещины — роль вертикальной свободной поверхности — часто выполняют уступы террас, берег реки, озера. Они, как и трещины, разгружают массив. В этом случае первой образуется трещина, параллельная берегу реки, а за ней последовательно образуются другие. В итоге, конфигурация рисунка повторяет конфигурацию берегов рек и озер.

Цитируем далее. «Образовавшиеся трещины способствуют охлаждению массива. Поверхности равных температур располагаются параллельно стенкам трещин и горизонтальным поверхностям полос, а направления наибольших градиентов температуры — перпендикулярно им. Так как напряжения прямо пропорциональны градиентам, наибольшие напряжения должны развиваться в направлениях наибольших градиентов температуры и, следовательно, вторичные трещины должны образовываться перпендикулярно первичным — продольным»[4]. Это закон перпендикулярности. В итоге, в соответствии с этими законами в однородных условиях формируется ортогональная сеть — массив разбивается на прямоугольники (рис. 3).

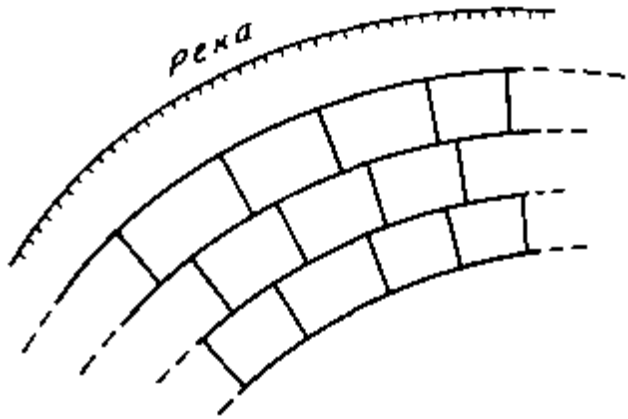


Рис. 3

Далее, по теории, в неоднородных условиях ширина зоны разгрузки вокруг трещины неодинакова. Поэтому первоначальные трещины не могут быть строго параллельны. В неоднородных условиях к тому же не выдерживается их прямолинейность. В итоге, формируется неупорядоченная полигональная сеть. Как видим, теория очень простая. Ее положения можно зазубрить за полчаса до экзамена. Но давайте рассмотрим ее внимательно. Из этой теории следует, что информативность рисунка крайне мала: правильная тетрагональная решетка — признак однородности грунтов, а неправильная — неоднородности. Это сразу настораживает. Теоретически строго доказано, что при однородных условиях энергетически оптимальный рисунок сети разрывных нарушений — правильные шестиугольники, и подобные рисунки иногда встречаются. Из теории же Б. Н. Достовалова это никак не следует.

Внимательно перечитаем все моменты процитированных выше положений теории.

Обоснование закона перпендикулярности начинается с

утверждения, что образовавшиеся трещины способствуют охлаждению массива, поэтому поверхности равных температур параллельны трещинам. Но ширина морозобойной трещины даже в самой широкой верхней части обычно измеряется миллиметрами. Она в большинстве случаев перекрыта толщей снега, часто забита кристаллами сублимационного льда, т. е. воздухообмен и, следовательно, теплообмен в ней крайне затруднены. Это, очевидно, и подтверждается натурными наблюдениями[5].

Следующая фраза в обосновании закона перпендикулярности: «Так как напряжения прямо пропорциональны градиентам, наибольшие напряжения должны развиваться в направлениях наибольших градиентов температуры...» Но градиент отмечается по вертикали — от холодной поверхности вглубь. Однако никаких напряжений, кроме сжимающих, от веса самого массива в этом направлении нет и быть не может. Свободная горизонтальная поверхность массива их неизбежно разгружает. То, что поверхностные напряжения пропорциональны градиенту температуры, следует из приведенной выше формулы Б. Н. Достовалова, но это неверно, как неверна и сама формула. В последующем мы приведем решение задачи, поставленной Б. Н. Достоваловым, пока же обратим внимание: из его формулы следует, что с удалением от края бруска напряжения линейно возрастают, поэтому если брусок очень тонкий и очень прочный, то даже при ничтожном, но очень быстром охлаждении его поверхности появится большой температурный градиент и на большом удалении от края бруска возникнут очень большие напряжения. На самом же деле, по закону Гука, растягивающие температурные напряжения в бруске не могут превысить величины $\sigma_x = E\alpha\Delta t$, где E — модуль упругости. В упругой среде, рассматриваемой Б. Н. Достоваловым, они определяются в первую очередь перепадом температуры, а не скоростью охлаждения (стальные телеграфные провода рвутся не из-за того, что в них возникают температурные градиенты, они ничтожны, а просто в результате охлаждения). В итоге же, после всех этих ошибочных и не следующих одно из другого утверждений следует правильный вывод, что полоса между двумя параллельными трещинами разбивается поперечными трещинами. Но никакие «мерзлотные» обоснования для объяснения закона перпендикулярности не нужны. Вполне было достаточно сказать, что в полосе между двумя параллельными трещинами, зоны разгрузки которых перекрываются, в перпендикулярном им направлении происходит разгрузка напряжений, и при последующем снижении температуры новая трещина в этой полосе может пойти лишь

перпендикулярно первоначальным трещинам, так как в этом направлении напряжения разгружены лишь частично.

Теперь процитируем еще раз обоснование закона параллельности: «При однородности материала расстояния от первой трещины, на которых напряжения достигают предельных значений, будут одинаковы и, следовательно, вторая трещина пойдет параллельно первой». То, что ширина зоны разгрузки в однородной среде вдоль трещины должна быть одинаковой, понятно. Но почему вторая трещина пойдет параллельно первой? В этой фразе вообще нет никакого обоснования! Что из этого следует? Поясняем: есть протяженный однородно напряженный массив. Где и в каком направлении образуется здесь первая трещина? В любом, все равновероятно, везде и во всех направлениях напряжения близки к критическим. После заложения первой трещины в окружающем ее пространстве происходит разгрузка напряжений, они становятся ниже критических. Естественно, что новая трещина в этой полосе уже образоваться не может. Но что при этом происходит за пределами полосы разгрузки? Здесь ничего не меняется, так как за пределы зоны разгрузки влияние первой трещины не распространяется. Здесь, так же как и до образования первой трещины, напряжения везде близки к критическим, следовательно, следующая трещина может возникнуть также где угодно и в любом направлении. Возникнуть в направлении, параллельном первоначальной, на краю ее зоны разгрузки и пойти вдоль нее трещина может лишь случайно. Вслед за второй, также в случайных местах и в случайных направлениях, за пределами зон разгрузок будут возникать и последующие трещины. При заходе их вершин в зону разгрузки другой трещины они попадают в полосу с анизотропными свойствами. Возле трещины значимы лишь напряжения, ориентированные вдоль нее. Трещина движется в направлении, перпендикулярном направлению максимальных растягивающих напряжений, поэтому она, заходя в зону разгрузки другой трещины, разворачивается в перпендикулярном ей направлении. Новые трещины, зарождаясь почти одновременно (весь массив одинаково напряжен), быстро перекроют его своими зонами разгрузки. Без дальнейшего снижения температур образование новых трещин станет невозможно. В итоге возникнет сеть, подобная приведенной на рис. 4.

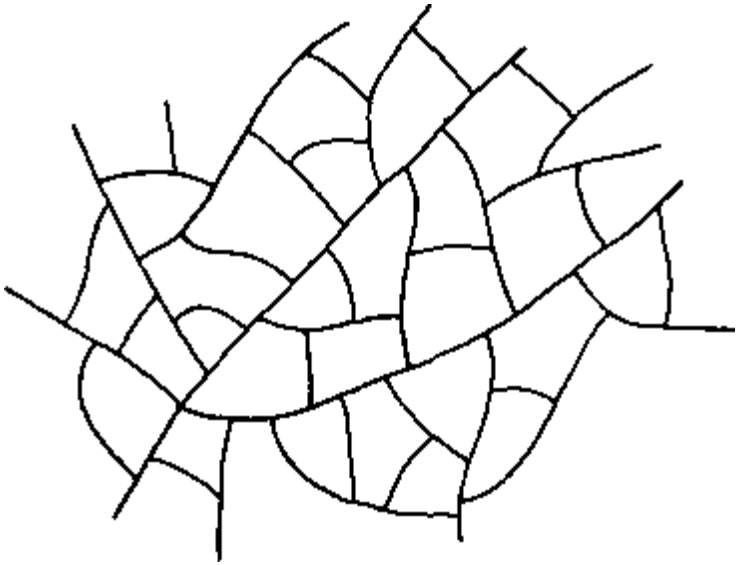


Рис. 4

Таким образом, наблюдаемая в природе параллельность морозобойных трещин из теории Б. Н. Достовалова не следует. Теория констатирует этот эмпирический факт, ничего не объясняя («за первой трещиной параллельно ей следует вторая»). Тем не менее ее изложение есть во всех учебниках. А если из литературы извлечь все критические замечания в адрес теории, то не наберется и десятка фраз. Причина живучести этой теории, наверно, в том, что другой, объясняющей появление в однородной среде строгой прямоугольной решетки, просто нет. Складывается странная ситуация: в основе взаимодействия трещин лежат всего несколько простых закономерностей, их рисунки также несложны, а теории нет. В чем причина?

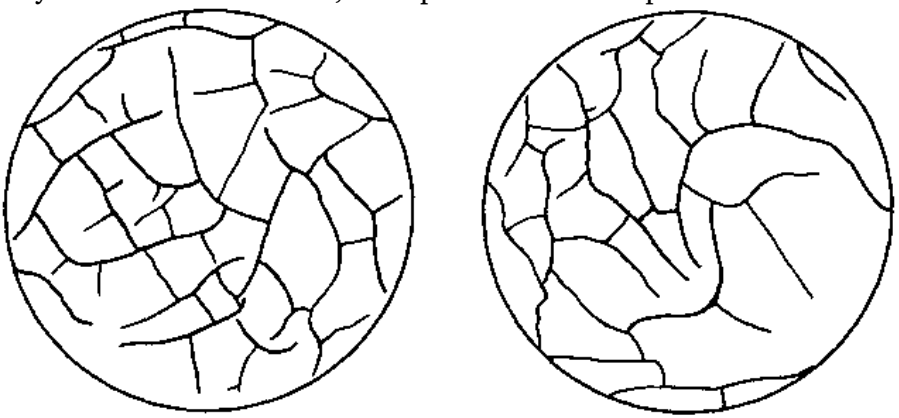


Рис. 5

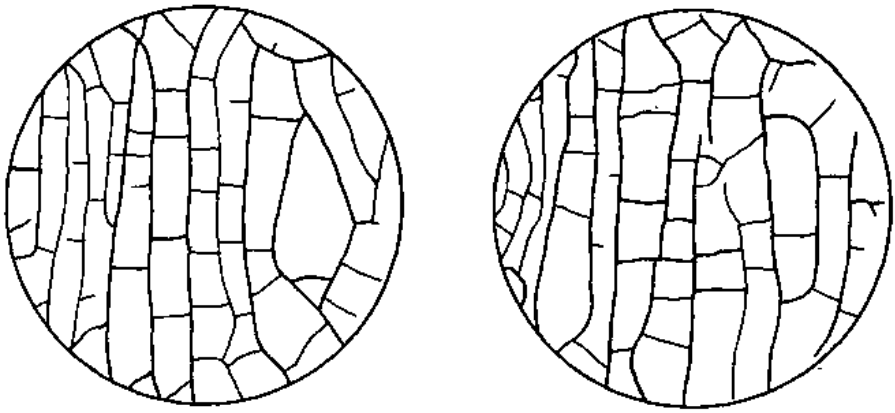


Рис. 6

Привлечение математического аппарата проблему пока не решает. Трудности здесь в том, что каждый вновь появившийся элемент решетки меняет граничные условия, меняет поля напряжений, и всю задачу приходится формулировать по-новому. Натурное моделирование? Морозобойное растрескивание трудно воспроизвести на модели, а наблюдения за формированием трещин в природе единичны. Но есть аналог — это трещины усыхания. Отличие лишь в том, что при морозобойном растрескивании трещины образуются в результате сжатия поверхности при охлаждении, а трещины усыхания — следствие усадки поверхности при испарении влаги.

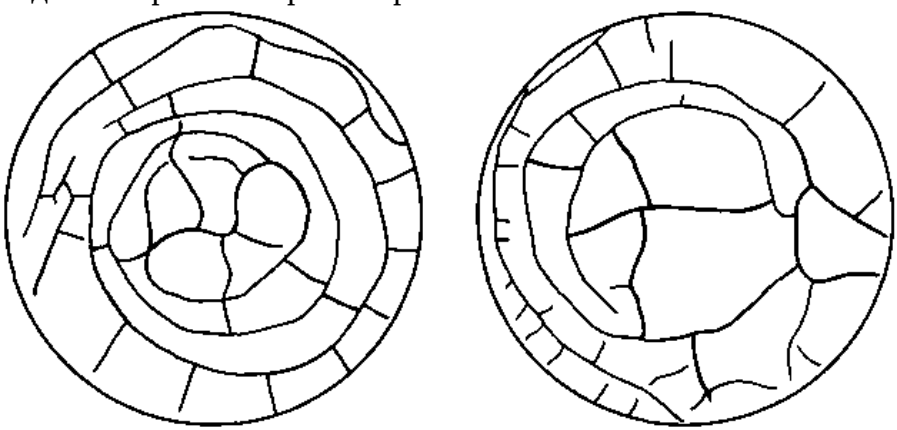


Рис. 7

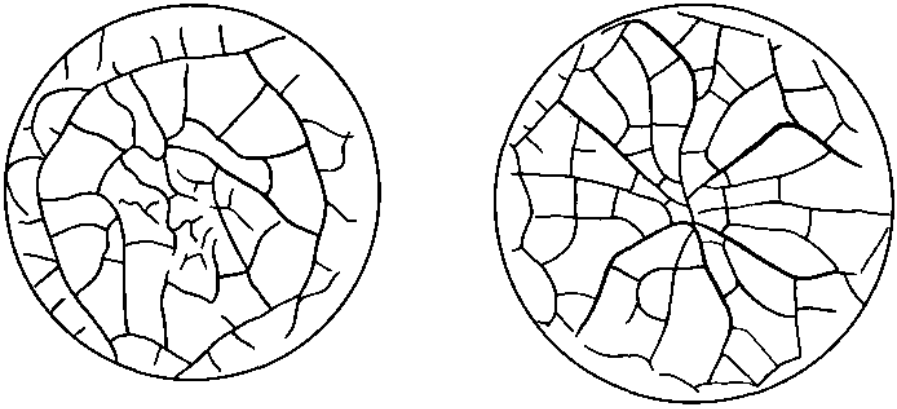


Рис. 8

Образование трещин на илистом дне высохшей лужи приходилось наблюдать, наверно, каждому. Если вы живете в старом многократно ремонтированном доме, то у вас всегда найдется объект для изучения рисунков. Трещины усыхания «очень любят» появляться на поверхности старой краски. Даже на тщательно охраняемых полотнах старых мастеров, если к ним подойти совсем близко, можно увидеть второй рисунок — рисунок трещин (кого считать его автором?)

Трещины усыхания легко моделировать. И, кажется, стоит только этим заняться, и мы все поймем. Но проведем такой эксперимент. Из порошка мела разведем жидкую однородную пасту и разольем ее одинаковыми порциями, одинаковым слоем в несколько одинаковых круглых гладких плоскодонных чашек. Поставим их рядом сохнуть на горизонтальную поверхность, и через несколько часов в разных чашках можем увидеть... совершенно разные рисунки (рис. 5—8). Все было одинаково, а чашки не просто чистые, но стерильные — из заводской упаковки. Результаты, как видим, интересные и непонятные (непонятные пока, к концу «Азбуки» все станет ясно).

Но вернемся к морозобойным решеткам на берегу реки. Если бы нам удалось разработать подробнейшую математическую модель или обеспечить абсолютную повторяемость опытов моделирования, исчерпывающее решение для речных решеток все равно найдено не было бы. Причина этого в том, что неверна традиционная постановка задачи, а именно — рассматривается массив с какими-то свойствами, границами и рассчитывается решетка, которая на нем возникает. Такая постановка большинству природных объектов не соответствует.

Реки, озера и другие художники Севера

Рассмотрим такой пример: представим какую-нибудь северную реку, выберем однородный мерзлый пойменный массив, ограниченный относительно крутым берегом реки. Допустим, что климат не очень суровый и морозобойное растрескивание не происходит. Но вдруг климат изменился, похолодало — и массив растрескался (пока это традиционная постановка). При этих условиях должен появиться рисунок, похожий на рис. 9, а. В этом примере есть берег реки, он разгружает край массива, и трещины к нему должны подходить под прямым углом.

А теперь вспомним, что любая равнинная река все время смещается, ее русло на излучинах подмывает один берег и намывает другой. Река постоянно обновляет поймы в своей долине. Значит, она должна постоянно обновлять и морозобойные рисунки. Зададим, что этот берег намывной, линия берега смещается и массив плавно наращивается. Климат уже изменился, и каждую зиму массив будет подвергаться растрескиванию. При этом трещины пойдут по тем же ослабленным местам, повторяя прежний рисунок. Проникнут они и во вновь намытую и уже промерзшую полосу берега, естественно, под прямым углом к нему (см. рис. 9, б). Через ряд лет берег еще больше сместится и в пределах вновь намытой полосы за счет повторного растрескивания сформируется система перпендикулярных берегу протяженных трещин, параллельных между собой. Берег как бы тянет за собой сеть трещин. Или трещины как бы все время тянутся вслед за отступающим берегом.

Как только берег отступит от первоначального положения на расстояние, превышающее ширину зоны разгрузки, то полосы, заключенные между этими параллельными трещинами, начнут разбиваться поперечными (см. рис. 9, в). В дальнейшем, по мере отступания русла эти трещины будут образовываться одна за другой через одинаковые промежутки, равные ширине зоны разгрузки (см. рис. 9, г—е). В итоге этих совместных мерзлотных и гидрологических процессов появляется рисунок с упорядоченностью и в ориентации, и в размерах.

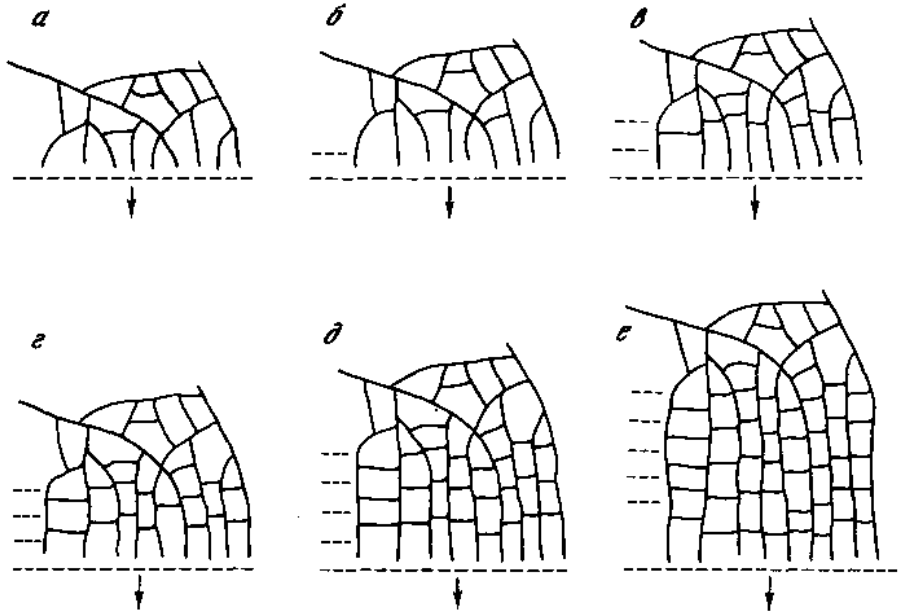


Рис. 9

Рисунок, сформированный таким путем, можно считать сингенетическим. Он нарастает маленькими порциями по мере нарастания массива. И какую бы площадь ни занимал весь рисунок, любой его кусочек сформировался (зародился) на берегу реки. По такому рисунку, как по хронологической записи (как по кольцам на срезе дерева), можно прочитать историю развития долины, по ней легко восстановить положение береговых линий, можно определить направление их смещения. Часть же рисунка, изображенная на рис. 9, а, — это эпигенетический рисунок, он сформировался единовременно на заранее сформированном массиве.

На низменностях Севера площадь озер составляет обычно 20—40%. Они окружены высокольдистыми берегами и поэтому находятся в непрерывном движении. Озера смещаются, меняют очертания, размеры их увеличиваются или сокращаются. И вслед за их берегами также тянутся морозобойные трещины, формируя строгие прямоугольные решетки, такие же, как речные. Но во многих случаях можно отличить, каким берегом (речным или озерным) она сформирована, и соответственно по виду решетки различать осадки разного генезиса. Так, намывные речные берега практически всегда увеличивают свой радиус кривизны, поэтому их решетка расходящаяся — длинные оси ячеек чаще ориентированы параллельно берегу (рис. 10, верхняя часть). Берега исчезающих озер обычно уменьшают радиус кривизны — в итоге формируется сходящаяся решетка (рис. 10, нижняя часть).

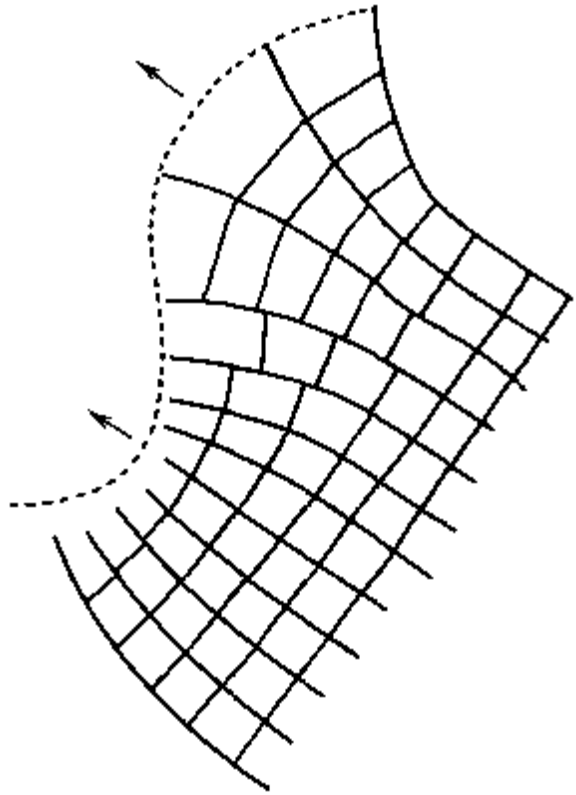


Рис. 10

Рассматриваемая схема формирования морозобойных рисунков, как в дальнейшем будет показано, далеко не универсальна, но типична для долин и озерно-аллювиальных равнин Севера. Озерно-аллювиальная равнина — это территория, поверхность которой сложена речными и озерными осадками, т. е. вся эта территория (вся ее суша) появилась в результате их отступания, и, следовательно, морозобойные рисунки этих территорий «нарисованы» их движущимися берегами. Мороз в данном случае — кисть, а художник — берега рек и озер.

Кажется, в рассмотренной схеме все очевидно? Но для тех, кто несколько раз прочитал положения теории Б. Н. Достовалова в учебнике, приведем дополнительные аргументы и сравним, насколько теория из учебника соответствует конкретному объекту.

На рис. 11 представлен полученный в результате теодолитной съемки план морозобойной решетки на левом берегу одной из проток р. Колымы в ее нижнем течении. Этот массив как типичный был выбран для проведения многолетних наблюдений за морозобойным растрескиванием. Левый, более низкий берег, на котором расположена эта решетка, — намывной.

Правый, более высокий, обрывистый берег этой протоки — подмываемый.

Мы видим тетрагональную решетку, ориентированную вдоль берега реки. Из теории Б. Н. Достовалова следует, что первой в этой сети образовалась ближайшая к берегу параллельная ему трещина, а затем последующие, параллельные ей. Соответственно самая дальняя от берега — самая молодая? Но река смещается, и тогда из теории Б. Н. Достовалова следует, что наблюдаемый рисунок сформирован совсем недавно, так как очевидно, что берег реки лишь недавно занял современное положение. Почему же тогда этот обширный пойменный массив не растрескался раньше, ведь он существует уже сотни лет, а климат и тогда был столь же суровым?

О возрасте заложения элементов морозобойной сети можно судить по возрасту ледяной жилы. Обычно чем она старше, тем шире, а ее размеры, в свою очередь, отражаются в полигональном рельефе — шире канавка над ней и больше валики отжатого грунта. Что же мы видим? У берега полигоны плоские, без валиков, канавки над жилами очень узкие, а у самого берега они еле заметны — это явно молодой полигональный рельеф. При удалении же от реки ширина канавок значительно возрастает.

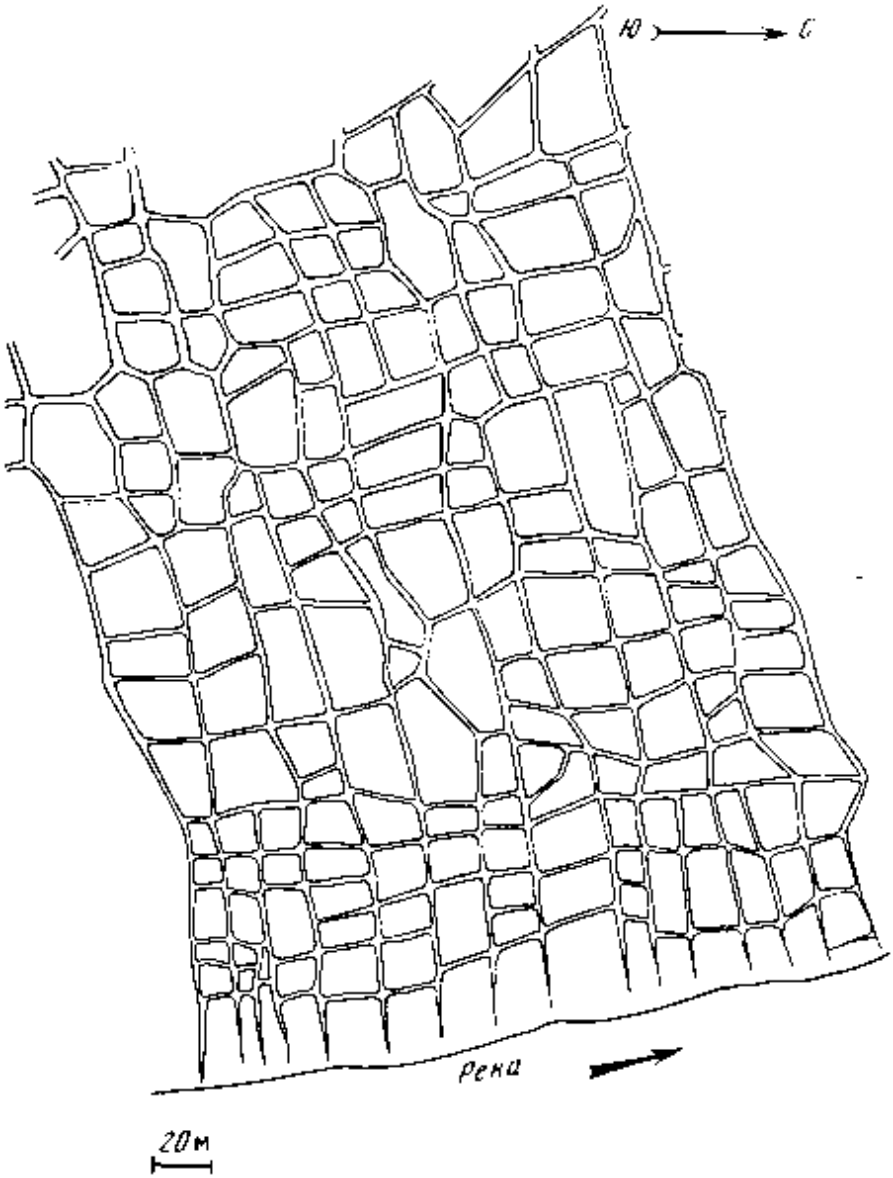


Рис. 11

Возраст ледяных жил был рассчитан и непосредственно по числу элементарных годичных жилок. Для этого на различном удалении от берега эта решетка ледяных жил была покрыта множеством шурфов. Кроме того, с помощью гидроразмыва на протяжении 50-метровой траншеи была полностью вскрыта одна из перпендикулярных берегу жил. В расчистках видно, что на перегибе берегового склона, где полигональный рисунок на поверхности еще не просматривается, ледяные жилы состоят из единичных жилок, а у самого русла они полностью

выклиниваются. На расстоянии 50 м ширина перпендикулярных берегу жил около 80 см, а в дальней части массива, где прирост жил сейчас почти прекращен, их ширина в среднем 120 см. В генерализованном виде изменение ширины ледяных жил при удалении от берега на рассматриваемом массиве показано на рис. 12. Явно, что ближайшие к реке элементы морозобойной сети наиболее молодые, т. е. эта решетка надстраивается по мере его отступания.

И еще один довод. На плане мы видим, что многие трещины, идущие вдоль реки, не являются магистральными, большинство из них явно образовано после трещин, перпендикулярных берегу. В соответствии же со схемой Б. Н. Достовалова должно быть наоборот (ср. рис. 11 с гипотетическим рис. 3).

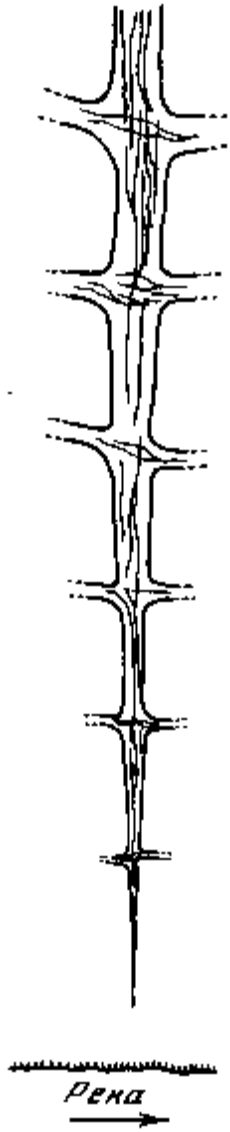


Рис. 12

Добавим, что в пределах рассматриваемого массива в течение пяти лет в десятках точек проводились наблюдения за температурными деформациями жильно-полигональных блоков, в том числе с помощью самописцев с непрерывной записью, это позволило точно фиксировать время образования трещин. Наблюдения показали, что в полосе, примыкающей к берегу, трещины в перпендикулярном ему направлении образуются значительно чаще, чем в параллельном.

А теперь отвлечемся от морозобойных решеток.

Формирование рисунков, структур путем бокового

наращивания — широко распространенное явление. Смещаются не только берега рек и озер, расширяются торфяные болота, смещается граница леса, смещаются границы физических и химических полей, например граница мерзлых пород, отступают берега морей, а вслед за ними тянется гидросеть — достраивается ее рисунок. Поле критических напряжений в литосфере не может сразу охватить большую территорию. Первоначально напряжения достигают величины прочности горных пород на небольшом участке, и лишь затем зона критических напряжений и, следовательно, зона деформаций расширяется. Да и сами литосферные плиты появились не сразу. Например, бесполезно рассуждать, какие из магистральных разломов на дне океана вблизи рифтовой зоны появились первые — перпендикулярные ей или параллельные. Литосферные плиты наращиваются здесь со скоростью нескольких сантиметров в год, соответственно с такой же средней скоростью достраивается и сеть разломов. Поэтому рисунок здесь такой строгий: параллельная сеть секущих рифтовую зону трансформных разломов. А полосы между ними разбиты разломами, параллельными оси рифта.

Улицы городов возникают также не сразу. Обычно граница города медленно, столетиями, отодвигается от его исторического центра и тянет за собой улицы. В противоположность этому, есть города (районы), сформированные эпигенетически: они заложены не как последовательное продолжение старой структуры, а сразу, по единому плану. Многие большие территории заселялись и покрывались транспортными сетями также не сразу. Вспомним движение волны переселенцев в Сибири и в Северной Америке. А биологические структуры? Они часто возникают тоже путем последовательного наращивания клеток от точек, линий и поверхностей роста. А символ строгого порядка — кристаллы? И здесь медленное наращивание, а если нет смещающейся границы структурообразования, то возникает аморфная структура, в ней нет дальнего порядка.

После этих примеров напрашивается вывод, что пространственная упорядоченность возникает при пространственной и, следовательно, временной последовательности в образовании структурных элементов. Порядок в пространстве — это порядок во времени! (?).

Наращивание — важный момент, но только этим не объяснить все многообразие и все детали природных рисунков. Чтобы разобраться во всех сложностях и закономерностях пространственной организации, перейдем к рассмотрению простейших (специально упрощенных) примеров и абстрактных моделей.

Кто последний? Я за вами!

Рассмотрим одномерные пространственные структуры. Они могут быть представлены точками, расположенными вдоль линии. Это, например, цепочка островов, телеграфные столбы вдоль дороги, голуби на карнизе, узелки на хлысте бамбука, трещины усыхания на изоляции старого электрического провода или капельки клея на нитке паука. Упорядоченность таких структур выражается в закономерном взаиморасположении этих точек (структурных элементов), т. е. взаимоположение каждого из них точно определено неким законом. В общем виде одномерная упорядоченность может быть охарактеризована как существование определенного пространственного ритма. Простейшая периодичность — повторение элементов через равные интервалы. Этот вид упорядоченности часто встречается или, во всяком случае, часто заметен.

Рассмотрим на примерах, каким путем может появиться такая упорядоченность.

Первый пример. По тропинке катится зубчатое колесо, оставляя упорядоченную цепочку точек. Ее упорядоченность — следствие другой упорядоченности. Из колеса упорядоченность «перекатывается» в тропинку.

Другой пример. Вы идете по заснеженной тропинке, и если идете равномерно, то появится пространственная упорядоченность — ваши следы. И в данном случае она есть следствие другой упорядоченности — периодичности во времени ваших шагов. Подобные структуры часто встречаются в природе. Например, язык отступающего, пульсирующего ледника оставляет последовательность конечных морен.

Еще пример. Дорога вначале была выложена одинаковыми бетонными плитами, а затем заасфальтирована. Если вдруг ударит сильный мороз, то асфальт лопнет, причем по стыкам плит, и дорога покроется трещинами, расположенными на одинаковом расстоянии одна от другой. В данном случае периодическая структура — также «слепок» с другой скрытой структуры. Нас же в наибольшей степени интересует процесс самоорганизации упорядоченных структур, появляющихся при отсутствии какой-либо внешней или первоначальной периодичности.

Представим бесконечно длинный однородный упругий брусок, свободно лежащий на ровной поверхности. Начнем его равномерно охлаждать. При этом в нем возникнут растягивающие напряжения σ_x. Как только они достигнут предела прочности,

брусок разорвется. Так как условия однородны, то образование разрыва может произойти в любом месте.

До образования разрыва между бруском и поверхностью силы трения (касательные напряжения) отсутствовали — он лежал свободно, и растягивающие напряжения уравновешивались силами внутреннего сцепления в бруске. После разрыва растягивающие напряжения у образовавшегося края бруска перестают уравновешиваться, и под действием этих неуравновешенных сил края бруска сжимаются, разрыв при этом расширяется. В движение будут вовлекаться все большие отрезки бруска. Это будет происходить до тех пор, пока сила трения, появившаяся под движущейся частью бруска (а она пропорциональна длине этой части), не уравновесит упругие силы, действующие со стороны ненарушенной части бруска, после чего движение краев бруска прекратится. Определим распределение растягивающих напряжений в бруске вблизи разрыва. Поместим центр координат в точку разрыва и выделим вблизи ее элементарный отрезок бруска длиной Δx (рис. 13). Запишем для него баланс сил. Небольшим изменением длины бруска за счет образования разрыва, деформациями сдвига в тонком бруске и силой инерции пренебрегаем. С одной стороны, на вертикальную грань отрезка бруска действует внутренняя сила $F_x = \sigma_x h$, где h — толщина бруска, с другой — $F_{x-\Delta x} = \sigma_{x-\Delta x} h$. Результирующая этих сил $\Delta F = \Delta\sigma_x h$. Она уравновешивается касательным усилием — силой трения, приложенной к основанию отрезка: $Q = T_x \Delta x$, где T_x — критическое касательное напряжение в основании бруска. Оно зависит от давления бруска на основание и от шероховатости поверхности. Для принятых однородных условий $T_x = \text{const} = K$. Приравняв силы, получаем $K\Delta x = h\Delta\sigma_x$, записав $d\sigma_x/dx = K/h$; после интегрирования, учитывая, что в точке разрыва $\sigma_x = 0$, получаем $\sigma_x = K/h^* x$. Тут же записываем оговоренное выше условие $\sigma_x <= \sigma_{пред}$, т. е. после стабилизации края бруска напряжения вблизи разрыва будут подчиняться линейному закону (рис. 14).

Для нас представляет интерес ширина раскрытия разрыва. По сути, это размер структурного элемента. Рассчитать его несложно. Не вдаваясь в подробности, отметим, что эта величина пропорциональна суммарной разгрузке напряжений вблизи разрыва, суть — высвободившейся при разрыве потенциальной энергии упругонапряженного бруска. Графически ее можно представить площадью фигуры, заштрихованной на рис. 14.

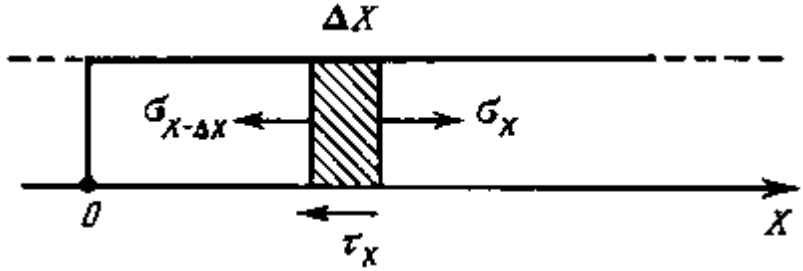


Рис. 13

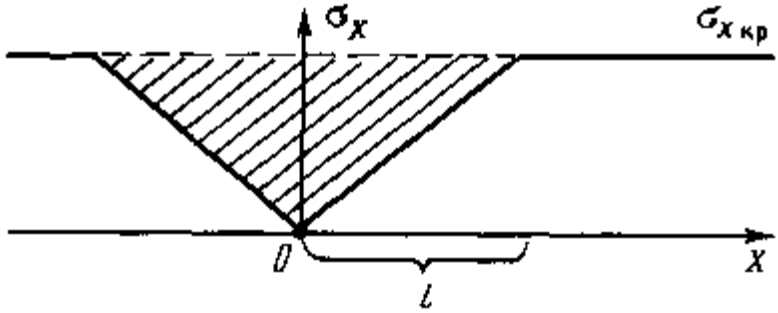


Рис. 14

Итак, образовался первый разрыв. Брусок однородный и равномерно напряжен. Поэтому тут же вслед за первым разрывом в случайных местах образуются и другие разрывы. Если расстояние между двумя разрывами превышает *2l*, то между ними останется неразгруженная полоса, и здесь возникнет еще один разрыв. Если это расстояние меньше *2l*, то зоны разгрузки соседних разрывов перекроются и новый разрыв между ними не появится.

При принятых условиях весь брусок быстро покроется разрывами и напряжения в нем везде будут ниже критических. Максимумы напряжений будут наблюдаться посередине между разрывами, а их значения здесь будут лежать в пределах $\sigma_{кр}/2 < \sigma_x < \sigma_{кр}$ (рис. 15, а). Разрывы один от другого будут располагаться на расстоянии $l < B < 2l$. В итоге получаем отчасти закономерную пространственную структуру, но строгий порядок в ней отсутствует.

Мы рассматривали брусок бесконечной длины. В случае его конечных размеров ситуация принципиально не меняется — края бруска при этом выполняют роль «первого» и «второго» разрыва. Реальная же первая трещина с равной вероятностью может появиться в любом месте бруска за пределами краевых зон разгрузки.

Если продолжать снижение температуры, то в этой модели

при неизменных прочих параметрах новые разрывы образовываться не будут. Рост растягивающих напряжений тут же приведет к дополнительному сжатию отрезков, потому что в его основании касательные напряжения критические.

Новые разрывы, разрывы второй генерации, появятся, если по каким-либо причинам со временем будет снижаться прочность брусков. Они будут разрываться посередине в точке максимальных напряжений. В первую очередь разорвутся наиболее длинные, наименее разгруженные бруски. Распределение напряжений в образовавшихся коротких брусках при этом будет подчиняться тому же линейному закону (см. рис. 15, б).

Как только прочность на разрыв уменьшится в 2 раза по сравнению с первоначальной, начнут появляться трещины третьей генерации (см. рис. 15, в), при снижении прочности в 4 раза — четвертой генерации и т. д. (см. рис. 15, г). Последовательность появления разрывов и распределение напряжений в брусках показаны на рис. 15.

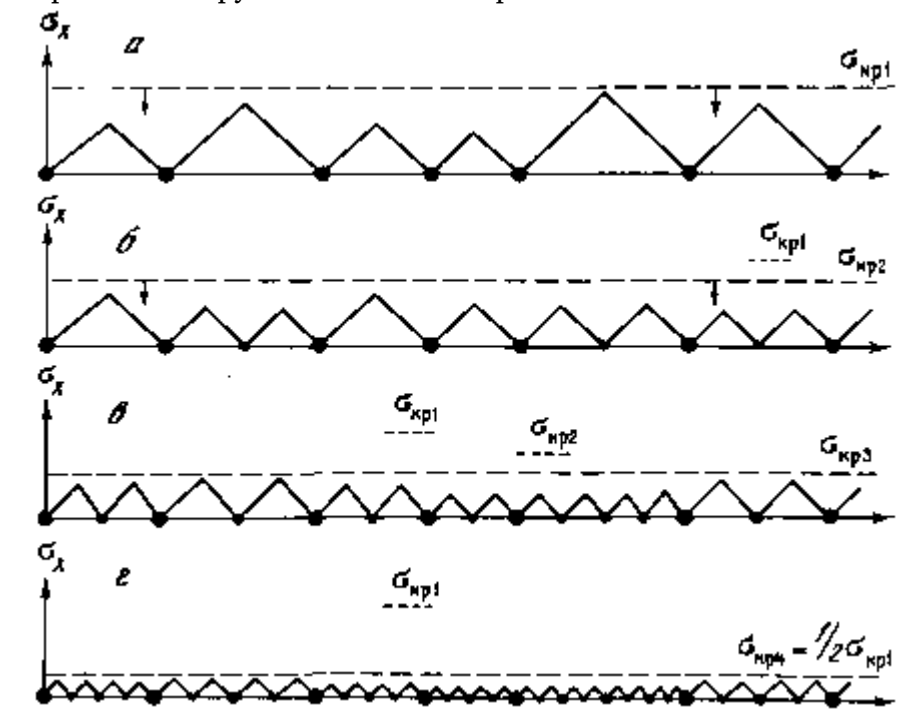


Рис. 15

В итоге мы видим структуру, состоящую из относительно мало упорядоченных в размерах ячеек первой генерации, внутри же этих ячеек взаиморасположение симметричное и строго закономерное, хотя и индивидуальное для каждой ячейки.

Теперь рассмотрим ту же задачу, но в условиях неравномерного охлаждения бруска, так, чтобы кривая распределения напряжений по длине бруска имела максимум (рис. 16, а), т. е. зададим смещение «фронта» охлаждения от центра к краям. В этом случае при снижении температуры место появления первого разрыва предопределено — он появится в точке максимума напряжений в тот момент, когда они здесь достигнут предела прочности бруска. Разрыв приведет к разгрузке напряжений в зоне бывшего максимума. В результате на расстоянии l от этой точки появятся два новых максимума напряжений (см. рис. 16, б). При дальнейшем снижении температуры напряжения достигнут и здесь предела прочности — возникнут два новых разрыва. Последующее охлаждение приведет к последовательному образованию новых разрывов, которые будут следовать один за другим на расстоянии l. В итоге такого латерального наращивания зоны охлаждения сформируется строго периодическая плотно упакованная структура (см. рис. 16, в).

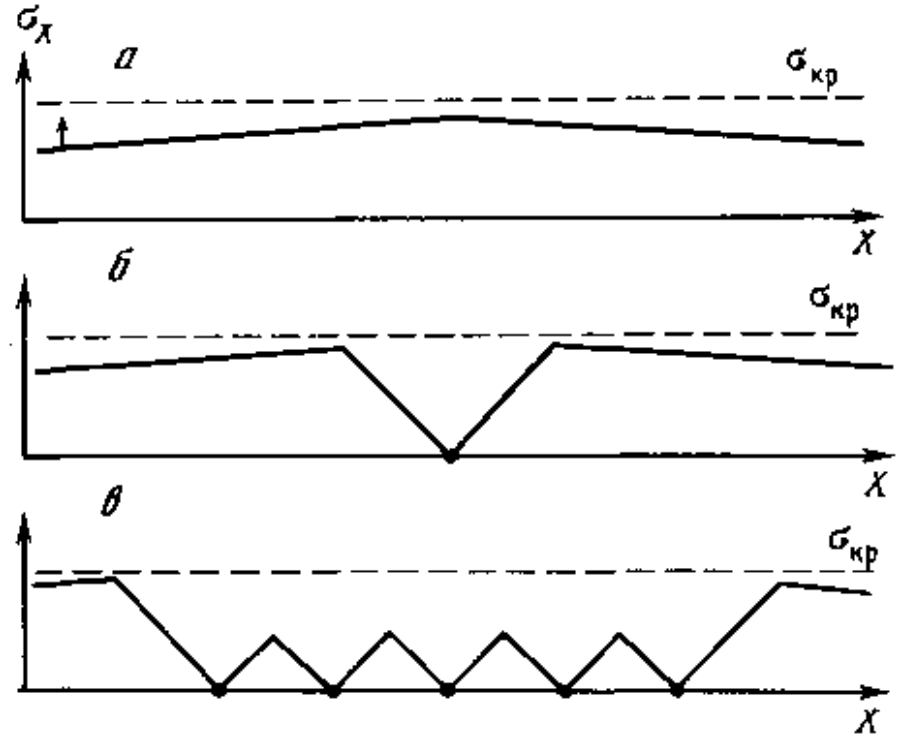


Рис. 16

Теперь немного изменим постановку задачи. Пусть напряжения вдоль бруска одинаковы и нарастают равномерно, но неравномерна по длине его прочность (см. рис. 17, а). В этом

случае первый разрыв возникнет в точке минимальной прочности бруска, в последующем фронт разрушений будет отодвигаться от этой точки. Каждый новый разрыв при этом будет возникать во все более напряженной части бруска. Поэтому расстояния между разрывами будут закономерно увеличиваться, так как для уравновешивания возрастающих внутренних напряжений требуется все большая сила трения и, следовательно, длина бруска. В итоге, наращивание напряжений приведет к формированию симметричной, пространственно-упорядоченной, но не периодической структуры. При удалении от первого разрыва расстояние между ними и их ширина будут нарастать (см. рис. 17, г).

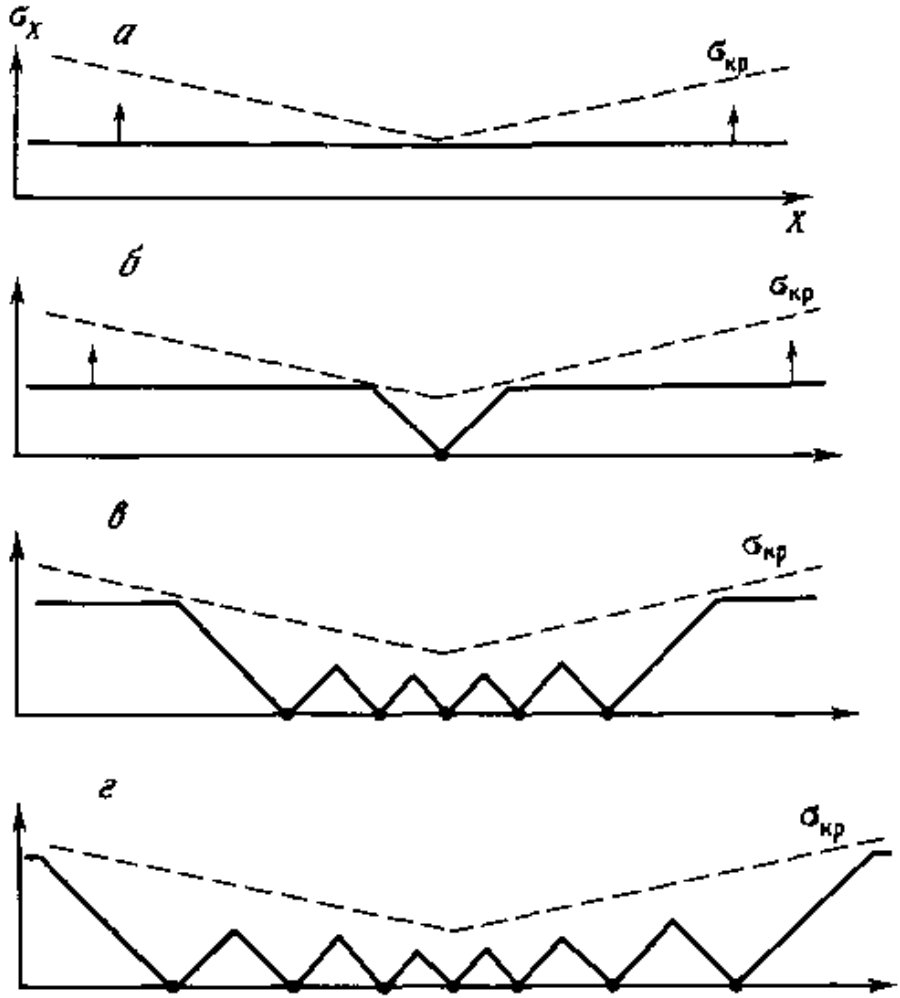


Рис. 17

Зададим другие условия. Пусть температурные напряжения в бруске равномерно снижаются от центра к краям, а прочность

бруска будет одинакова по всей его длине. При этом со временем она будет равномерно снижаться. Рассмотрим левую от максимума напряжений часть модели (рис. 18, а). Последовательность формирования в таких условиях структуры видна на рисунке. Расстояние между разрывами и их ширина здесь уменьшаются по мере удаления от точки первоначального максимума напряжений. Отметим, что в этом примере при снижении прочности бруска более чем в 2 раза относительно уровня, соответствующего появлению первого разрыва, в центре структуры начнут образовываться разрывы второй генерации. При снижении прочности в 4 раза появятся разрывы третьей генерации и т. д. (см. рис. 18, б—д).

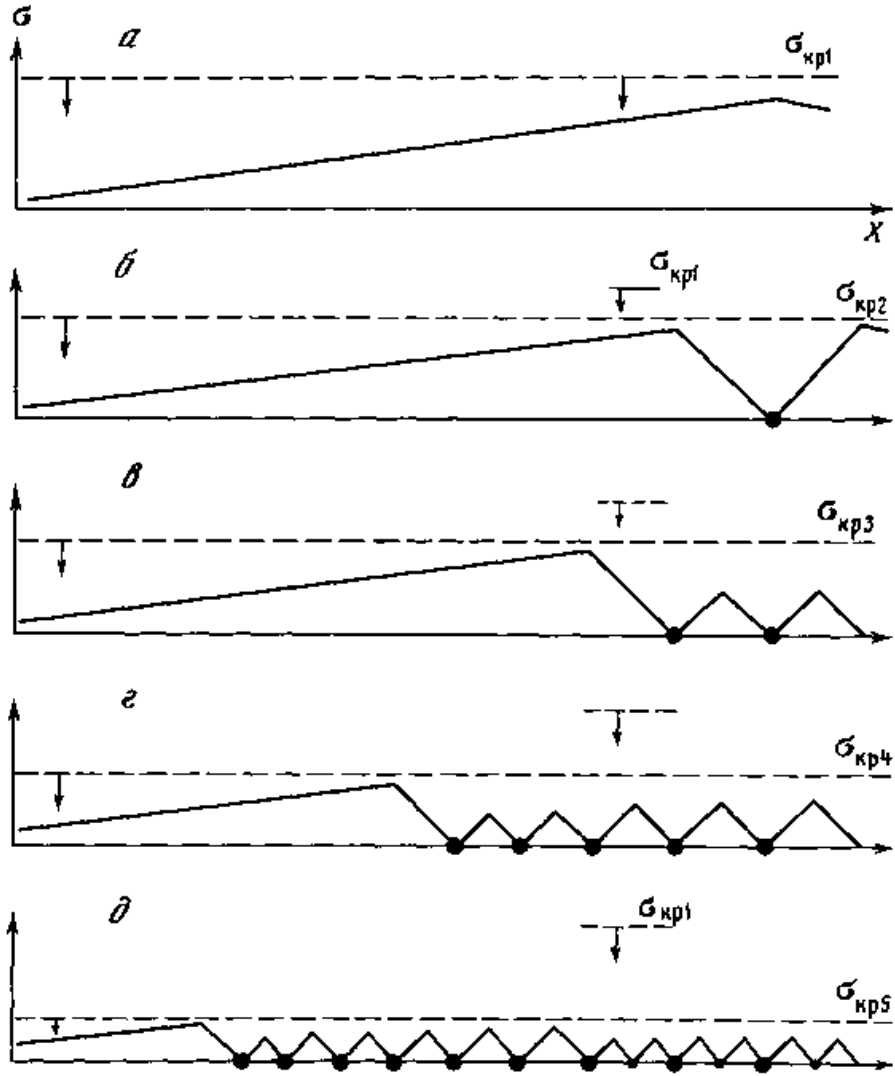


Рис. 18

Рассмотренные примеры показали нам появление закономерной пространственной упорядоченности в результате явлений, изменяющихся во времени и пространстве непериодически.

Теперь рассмотрим подобный пример, но с нелинейным законом разгрузки напряжений. Примем те же условия, что и в предыдущей модели, но зададим, что бесконечный брусок жестко закреплен к недеформируемому основанию. Зададим также, что он охлаждается с поверхности, в его основании температура не меняется, а изменение температуры в толще бруска подчиняется линейному закону (это задача, которую рассматривал Б. Н. Достовалов).

При охлаждении в бруске возникают растягивающие напряжения, они также будут изменяться по линейному закону. У поверхности они равны $\sigma_x = E\alpha\Delta t$ (Δt — величина охлаждения поверхности), у основания бруска — нулю. Так как температурное растяжение бруска по длине равномерно, то никаких сдвигов как внутри бруска, так и относительно жесткого основания не происходит, касательных напряжений не возникает. Напряженные слои бруска как бы пассивно лежат один на другом и на основании. Растягивающие напряжения в них уравновешиваются внутренним сцеплением. При достижении напряжениями предела длительной прочности ($\sigma_x = \sigma_{пред}$) образуется разрыв. Вблизи него растягивающие напряжения перестают сдерживаться силами внутреннего сцепления, и берега разрыва под действием растягивающих напряжений стремятся разойтись. Но так как его основание закреплено жестко, то смещается лишь его верхняя часть. В итоге, вблизи разрыва происходит сдвиг бруска (рис. 19).

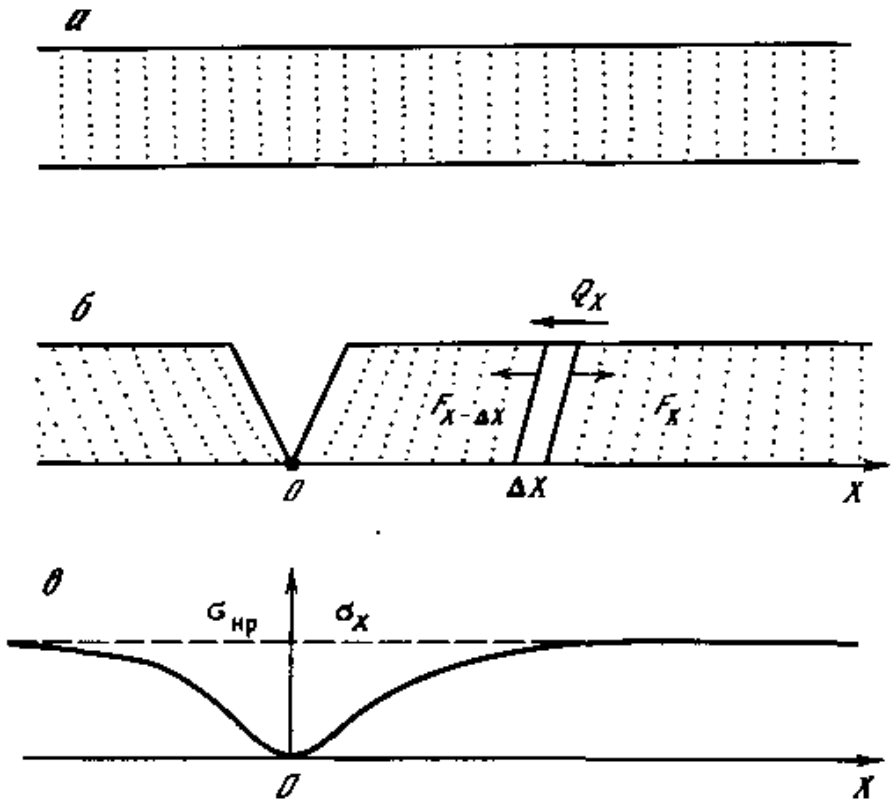


Рис. 19

Введем допущение, что вертикальные деформации в бруске отсутствуют — сдвиг плоскопараллельный. Выделим вблизи разрыва элементарный отрезок бруска шириной Δx. К одной его вертикальной грани приложена сила $F_x = \sigma_x h/2$, к другой — $F_{x-\Delta x} = \sigma_{x-\Delta x} h/2$, их результирующая $\Delta F_x = \Delta\sigma_x h/2$ уравновешивается касательными напряжениями внутри элементарного бруска, сумму которых можно представить касательной силой Q_x, приложенной к верхней грани элементарного бруска. Запишем закон Гука для сдвига: $Q_x = \Delta x G S_x/h$, где G — модуль сдвига, S_x — абсолютный сдвиг. Приравняв действующие силы, получаем:

$\Delta\sigma_x h/2 = \Delta x G S_x/h$ или $d\sigma_x/dx = -2GS_x/h^2$.

Величину сдвига верхней части элементарного бруска S можно определить, рассчитав, насколько в сумме сократилась длина части бруска, лежащая вправо от элементарного бруска. Эту часть также разобьем на элементарные бруски шириной Δx. После образования разрыва верхняя грань каждого из них в соответствии с законом Гука сжалась на величину $\Delta l = \Delta x(\sigma_{пред} - \sigma_x)/E$. Запишем $dl = (\sigma_{пред} - \sigma_x)\, dx/E$. В итоге, после интегрирования получаем сдвиг элементарного бруска:

$$S_x = \int_x^\infty \frac{(\sigma_{\text{пред}} - \sigma_x)}{E}\, dx.$$

Подставив это выражение в полученное выше равенство, получим уравнение

$$\frac{d\sigma_x}{dx} = -\frac{2G}{h^2 E} \int_x^\infty (\sigma_{\text{пред}} - \sigma_x)\, dx.$$

Его решение, с учетом того, что в точке разрыва нормальные растягивающие напряжения отсутствуют, дает зависимость

$$\sigma_x = \sigma_{\text{пред}} \left(1 - e^{-\frac{x}{h}\sqrt{\frac{2G}{E}}}\right).$$

В итоге получаем, что после образования трещины напряжения у ее края равны нулю, а при удалении экспоненциально асимптотически увеличиваются, стремясь на бесконечности к величине, равной напряжениям в ненарушенном массиве. В данном случае — к напряжениям, равным прочности бруска на разрыв (см. рис. 19, в), т. е. четкую зону разгрузки выделить нельзя, теоретически трещина разгружает в той или иной степени весь массив. Если так, то в нашей модели вторая трещина, если температура не снижается, должна возникнуть на бесконечном расстоянии от первой. Но при удалении от трещины напряжения растут очень быстро, и на расстоянии, в несколько раз превышающем глубину трещины, разгрузка напряжений почти незаметна. Но продолжим рассматривать идеальную схему.

Примем, что однородный брусок имеет конечные размеры, тогда у его краев будет происходить разгрузка напряжений так же, как будто брусок ограничен трещинами. Края разгружают весь массив, чем дальше от них, тем в меньшей степени. Максимальные напряжения при этом будут наблюдаться в центре бруска, и при снижении его температуры здесь возникнет трещина. При большем снижении температуры эти два бруска, в свою очередь, разорвутся пополам трещинами новой генерации. Еще большее снижение приводит к образованию еще одной генерации и т. д. Глубина проникновения трещин в нашем примере одинакова — трещина проникает до основания бруска. В отличие от предыдущего примера, когда новые генерации появлялись при снижении прочности, в этом ширина всех трещин будет одинаковой. Первоначальные более широкие трещины с

появлением соседних будут немного закрываться. В итоге мы получим строго упорядоченный рисунок.

Изменим условия эксперимента. Начнем охлаждать протяженный брусок, имея максимум охлаждения в центре (рис. 20, а). Здесь напряжения в первую очередь достигнут величины, равной прочности, и появится трещина. Ее появление приведет к формированию вокруг двух новых максимумов напряжений (см. рис. 20, б). Последующее охлаждение бруска приведет к заложению в этих точках новых трещин. Соответственно уже рядом с ними появятся новые максимумы напряжений (см. рис. 20, в) и т. д. Если наклон кривой функции напряжений при этом в ходе их наращивания не изменится, то в итоге появится пространственная периодическая структура.

Рассмотрим теперь другое явление — складки. Их простейший (и неприятный) пример — складки на бумаге: намочите кромку листа — и она начнет разбухать, появятся сжимающие напряжения и складки. Это антипод трещин усыхания. Антипод морозобойных трещин — температурные складки. Чтобы их получить, наклейте полоску липкой пластиковой ленты (но не натягивая ее) на линейку и нагрейте ее. А еще лучше склеить лавсановую ленту с тонкой полиэтиленовой (у этого материала очень высокий коэффициент температурного расширения), и после нагрева вы получите мелкие крутые полиэтиленовые складки. А теперь этот пример идеализируем.

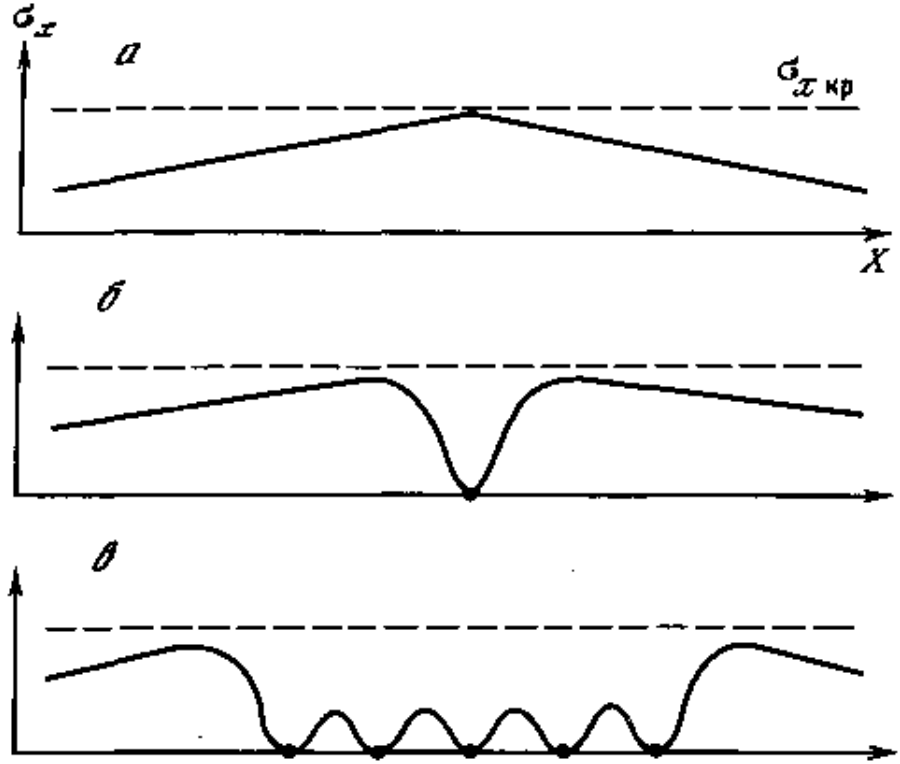


Рис. 20

При равномерном нагреве бесконечного однородного бруска, нежестко прикрепленного к плоскости, в нем возникнут сжимающие напряжения. Как только они достигнут некоторой критической величины, состояние бруска станет неустойчивым, и в каком-то случайном месте появится складка. В окружении этой складки произойдет разгрузка сжимающих напряжений. В это же время, также в случайных местах, будут появляться другие складки. Их зонами разгрузки в скором времени перекроется весь брусок. Строго закономерной структуры в этом случае не возникнет. В случае же неравномерного нагрева бруска так, чтобы фронт нагрева (фронт высоких напряжений) смещался вдоль него, складки будут возникать одна за другой на равных расстояниях.

Другой гипотетический пример. Пусть в литосфере существует протяженный разлом, под которым вдоль него на глубине располагается протяженная зона с породами, насыщенными магмой. Допустим, со временем давление магмы растет, и как только в какой-то точке оно превысит некоторую величину, возникает пробой, магма через разлом прорывается к поверхности — появляется вулкан. В его окружении давление магмы в резервуаре при этом падает — разгружается.

Предположим, что «прочность разлома на пробой» по его длине одинакова, а давление магмы в резервуаре в какой-то точке имеет максимум, в стороны же от этой точки вдоль разлома оно плавно снижается. Естественно, что при повсеместном нарастании давления первый вулкан появится в этой точке. В зоне его разгрузки давление магмы упадет, и новый вулкан образоваться здесь уже не сможет. При этом на удалении от первого вулкана (на краях его зоны разгрузки) появятся два новых максимума давления магмы. При росте давления здесь возникнут новые вулканы. В свою очередь, на краю их зоны разгрузки возникнут новые вулканы. В итоге появится упорядоченная структура, в которой элементы (вулканы) будут расположены на расстоянии, равном половине ширины зоны разгрузки.

От природных явлений попробуем перейти к социальным структурам. Рассмотрим такой схематичный пример. Продаются участки стандартного размера под жилищную застройку, расположенные вдоль дороги. Цена участков одинаковая. Территория предварительно на участки не разбита. Желающие могут купить любой участок, но при этом обязательно условие, оговоренное службой пожарной безопасности, — участки должны располагаться на расстоянии не меньше l один от другого. Участки неравноценны: дорога идет к городу, и чем ближе к нему, тем большую ценность они представляют для покупателей. Жить хотя бы на один метр ближе к городу — их цель. Если начальная цена высока, то поначалу никто эти участки и не покупает. Однако по мере роста потребности в жилье и доходов цена участков в глазах покупателей достигает назначенной. Очевидно, что наибольшую ценность представляет ближайший к городу участок, он и будет продан первым. Также очевидно, что следующий проданный участок будет расположен за ним, как можно ближе к городу, т. е, на расстоянии l от первого, и т. д. Участки будут покупаться по мере роста потребностей в жилье. Если он замедлится, то и распродажа замедлится, но все равно в итоге сформируется закономерная пространственная структура с одинаковым расстоянием l между элементами.

Другой пример. Представим прямую, без развилок автостраду с однородными интенсивностью и условиями движения, соединяющую два города А и Б. Автомобили время от времени ломаются, и им требуется техническое обслуживание. Эта потребность удовлетворяется за счет станций техобслуживания, а они, соответственно, имеют от этого прибыль и заинтересованы в ее получении. Поток автомобилей для них — «ресурс». Зададим, что в обоих городах есть станции техобслуживания и они здесь полностью удовлетворяют (разгружают) все потребности в

ремонте. За пределами городов их нет. Поэтому чем дальше от города, тем выше потребность в квалифицированном техобслуживании. Очевидно, что максимальна она посередине между двумя городами, отсюда труднее всего вернуться на сломанной машине и доставка сюда механиков самая дорогая (рис. 21, а). Соответственно, здесь наиболее вероятно строительство новой станции. Вначале примем, что интенсивность потока транспорта невелика и строительство ее здесь нерентабельно. Но со временем, по мере роста грузооборота между городами потребность в техобслуживании в этой точке достигает уровня, обеспечивающего рентабельность. И тогда между городами появляется такая станция. Она разгрузит вокруг себя эту потребность. При этом на трассе возникают две новые точки, в которых потребность в станции техобслуживания максимальна (см. рис. 21, б). При дальнейшем росте грузопотока здесь появятся станции третьей генерации и т. д. (см. рис. 21, в—г). В итоге сформируется закономерная пространственная структура.

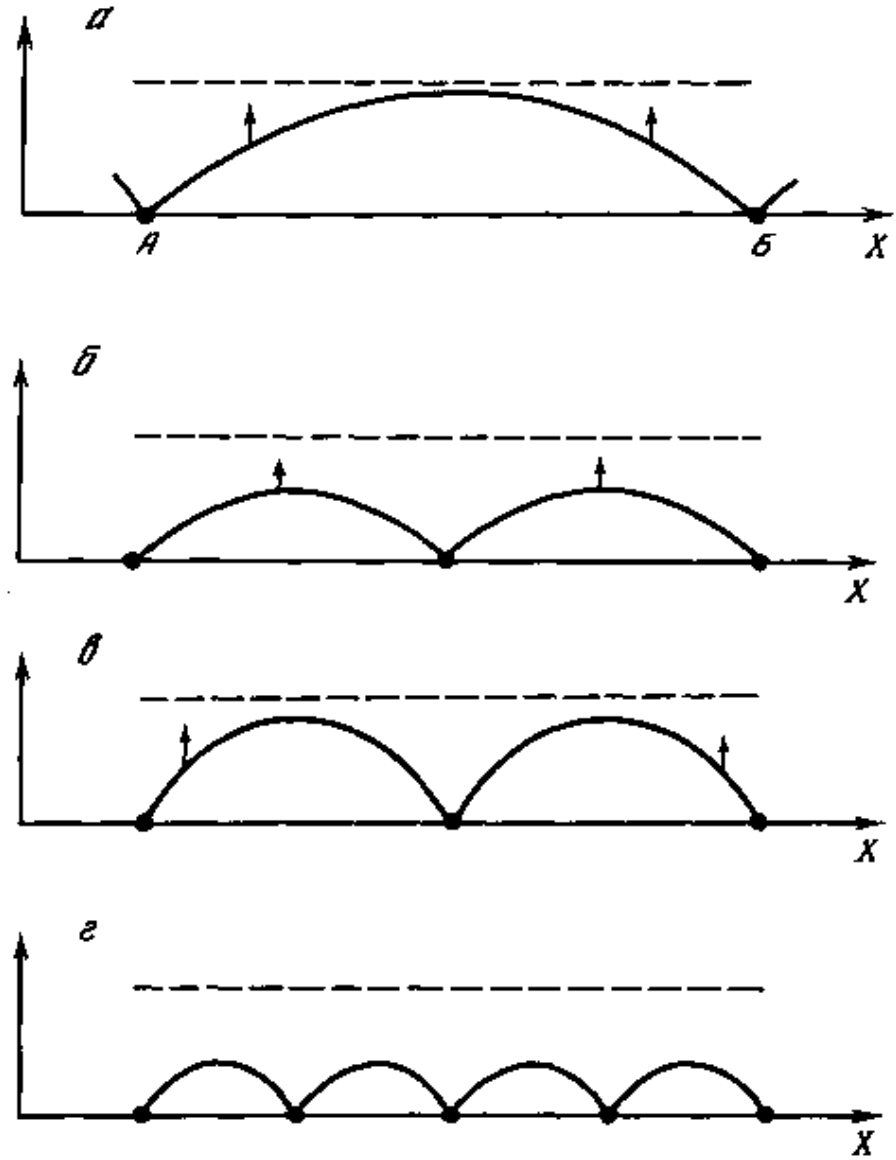


Рис. 21

Теперь, после рассмотрения этих примеров попытаемся их формализовать и выявить общие условия, необходимые для формирования подобных пространственно-упорядоченных структур.

От конкретного к абстрактному

Мы рассматривали разные процессы и использовали разные слова: «растяжение», «сжатие», «потребность», «разрыв», «складка», «станция»... Однако заметим, схема описания последовательности появления структуры при этом не менялась. Во всех рассмотренных примерах описывалась некоторая меняющаяся во времени пространственная функция, характеризующая какой-то потенциал территории — способность совершать или побуждать действие (сжимающие или растягивающие напряжения, социальные потребности, наличие какого-то ресурса) $E_x = f(x, T)$. Одновременно с этим отмечалось, что существует некоторая функция порогового уровня — прочность на разрыв, арендная плата, порог рентабельности $P_x = f(x, T)$. Первоначально везде выполнялось условие $P_x > E_x$ и структурные элементы отсутствовали. Но величины потенциальной функции со временем росли, и в какой-то момент в какой-то точке выполнялось условие $E_x = P_x$ — потенциал достигает порогового уровня, и тогда здесь возникал структурный элемент — разрыв, трещина, автостанция и т. д. (для математиков такое явление — это разрыв функции, для физиков — фазовый переход, для философов — переход количества в качество). Появление структурного элемента сопровождалось изменением вокруг него потенциальной функции, происходила ее «разгрузка». При этом рядом появлялись ее новые максимумы. Дальнейшее наращивание ее значений вызывало появление новых элементов и т. д.

Воспользуемся этой универсальной схемой и продолжим анализ закономерностей упорядоченного структурообразования в терминах «потенциал», «порог», «элемент», «разгрузка». Из этой схемы следует, что для прогноза структуры достаточно знать пространственно-временную динамику потенциала и порога (знать функции E и P). Значит, особенности структуры заложены в особенностях этих функций.

Потенциальную и пороговую функцию можно объединить в одну в виде $f(E_x, P_x) = E_x — P_x$. Назовем ее пороговo-потенциальной функцией. Эта функция не имеет положительных значений. По мере роста во времени значений потенциальной функции или снижения значений пороговой функции значения суммарной функции возрастают — кривая $f(E_x, P_x)$ приближается к нулю. Первый структурный элемент появится в момент достижения максимумом этой функции нуля.

В пределах рассматриваемого отрезка порогово-

потенциальная функция может иметь несколько максимумов (рис. 22, а). В этом случае при наращивании ее значений структурные элементы будут возникать в этих точках (см. рис. 22, б). Соответственно образовавшаяся структура будет отражением неоднородностей среды. Зоны разгрузки элементов этой структуры не перекрывались, и элементы не влияли на образование друг друга. Это не интересно, здесь нет самоорганизации. Поэтому мы будем рассматривать гладкие случаи, когда первоначально на рассматриваемом отрезке порогово-потенциальная функция имеет не больше одного максимума и монотонно убывает от этого максимума. Более сложные функции с макронеоднородностями всегда можно разбить на такие участки. При таком условии положение первого элемента задано, его появление создает два новых максимума, в которых при наращивании потенциала образуются следующие элементы, и т. д. Расстояние от первоначального до следующего элемента определяется в первую очередь закономерностями разгрузки. Величина разгрузки потенциальной функции вблизи элемента в каждом конкретном случае в зависимости от природы наблюдаемой структуры может подчиняться различным закономерностям. Она может зависеть лишь от расстояния до структурного элемента, а может определяться еще и величинами потенциальной функции — составлять какую-то долю от их значений. Закономерность разгрузки при этом может быть описана линейным, степенным, экспоненциальным законами и т. д. (рис. 23). Ширина зоны разгрузки при формировании многих структур может быть фиксированной и четко выраженной (рис. 24). В этом случае положение новых максимумов, и соответственно элементов, четко определено. Если же разгрузка асимптотическая, то положение следующего максимума будет зависеть от первоначального наклона кривой потенциальной функции: чем он больше, тем ближе элементы (рис. 25). Если наклон потенциальной кривой на ненарушенном участке со временем по мере роста ее значений не изменяется (рис. 26) и остаются неизменными закономерности разгрузки, то в итоге элементы первой генерации будут расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Если эти характеристики закономерно изменяются, то появится структура с соответственно закономерно изменяющимся расстоянием между элементами. Если же потенциальная функция не имеет максимума, не имеет наклона, строгий ритм мы не получим.

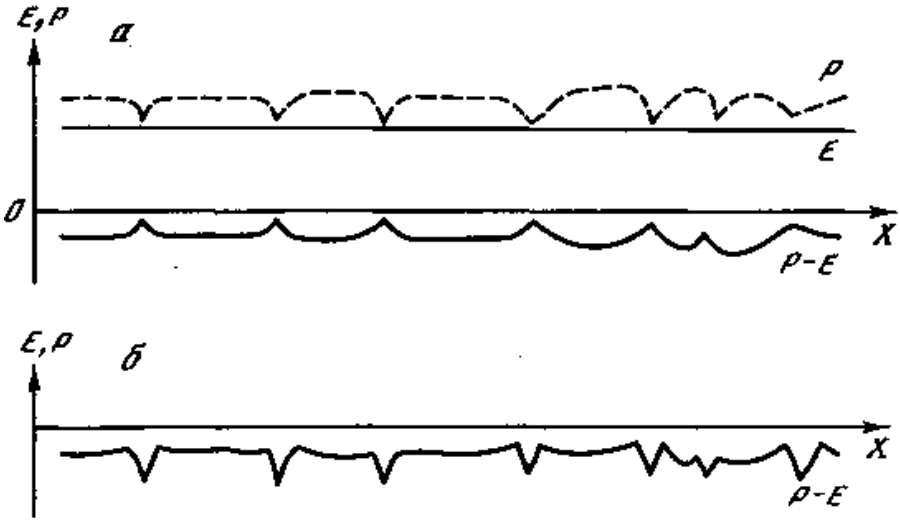


Рис. 22

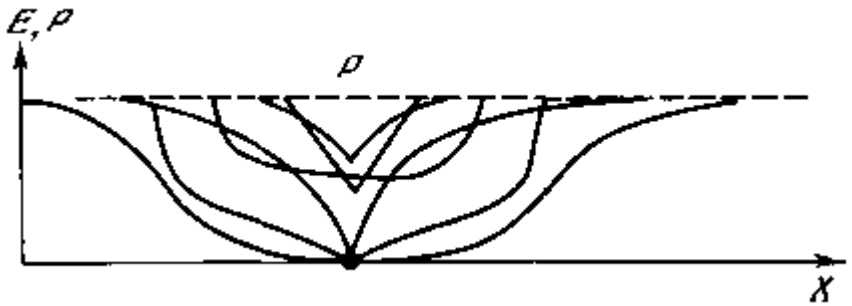


Рис. 23

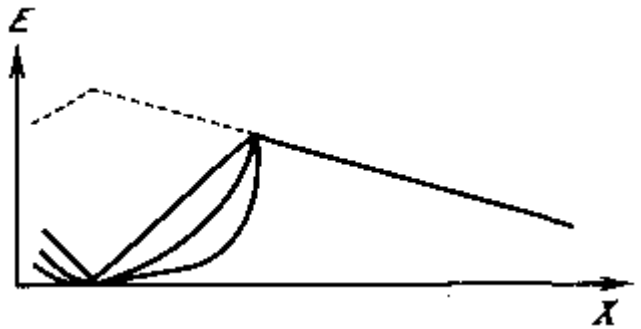


Рис. 24

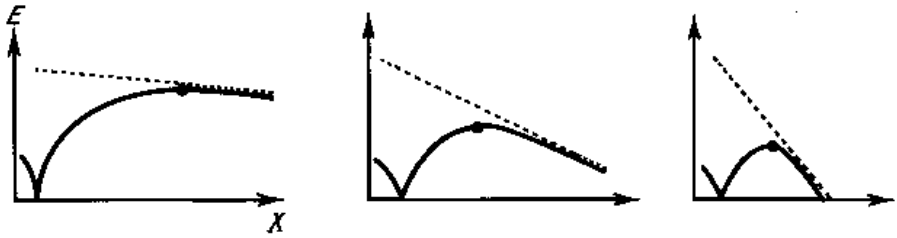


Рис. 25

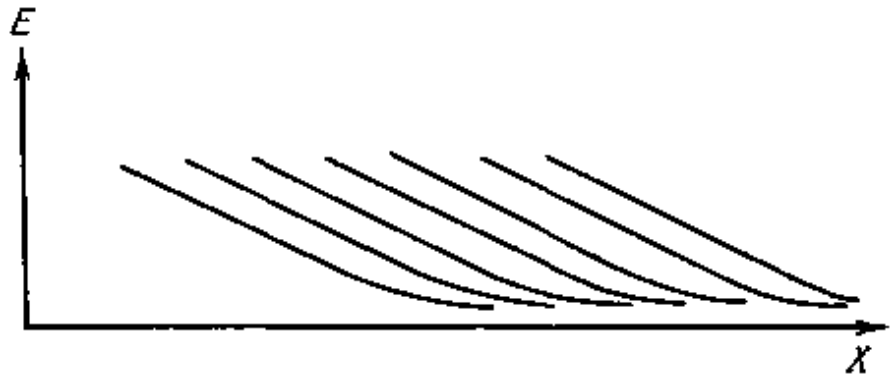


Рис. 26

Идеальных пространственных однородных условий в природе не существует, поэтому рассматриваемая схема универсальна. Закономерный же пространственный ритм мы видим относительно редко только потому, что процессы самоорганизации подавлены мезо- и микронеоднородностями. На фоне этих шероховатостей наклон кривой порогово-потенциальной функции зачастую незаметен. Наличие микронеоднородностей не допускает также теоретически возможную зону разгрузки бесконечной ширины. Величина разгрузки при удалении от структурного элемента убывает, и на каком-то расстоянии она становится практически незаметной на фоне микрофлуктуаций. Зона разгрузки часто может быть выражена в виде вероятностной кривой, т. е. структурный элемент может появиться и в непосредственной близости от другого, но с меньшей вероятностью. Соответственно порогово-потенциальную функцию во многих случаях следует рассматривать (задавать) как функцию вероятности возникновения структурного элемента.

Очевидно, что чем больше наклон кривой порогово-потенциальной функции (чем резче смещающаяся граница) и чем меньше ее шероховатость, тем более выдержанным будет расстояние между структурными элементами (рис. 27). При высоком уровне шероховатости и малом наклоне потенциальной

кривой эффект смещающейся границы затушевывается — элементы будут возникать без строгой пространственной периодичности. Однако он может быть выявлен и в этом случае по средней плотности структурных элементов. Упаковка будет более плотной.

Во всех предыдущих примерах мы предполагали, что при появлении элементов потенциал в этой точке навсегда становился нулевым. Но возможна ситуация, когда при общем наращивании потенциала он будет возрастать и в этой точке. В обычных условиях это не принципиально — все равно здесь будет минимум порогово-потенциальной функции. Но появление структурного элемента в своем окружении может изменить и значение пороговой функции. Законы изменения этой функции могут быть при этом различными.

Рассмотрим вариант, при котором величина пороговой функции изменяется лишь в точке, в которой появился структурный элемент. Например, в окружении морозобойной трещины прочность грунтов на разрыв не меняется, но сама трещина ослабляет массив — в вершине трещины его прочность может быть много меньше прочности ненарушенного массива. Поэтому при дальнейшем охлаждении возможна ситуация, когда значения потенциальной функции достигнут значений пороговой функции в точках расположения структурных элементов (рис. 28, а), в результате произойдет их углубление (см. рис. 28, б). Более глубокая трещина в большей мере разгружает окружающий массив. Поэтому элементы новых генераций могут не возникнуть. Эту ситуацию можно проиллюстрировать и на примере социальных структур. Мы рассматривали схему, по которой при росте потока транспортных перевозок по автостраде между станциями техобслуживания первой генерации появляются станции второй генерации. Но разгрузка возрастающих потребностей в техобслуживании может быть достигнута путем «углубления» станций первой генерации, например, за счет введения дополнительных мощностей, новых видов обслуживания, повышения его качества, за счет создания передвижных бригад. Это зачастую выгоднее строительства новых станций, так как не требует дополнительных расходов на аренду земли, создания новой инфраструктуры и т. д. Суть — пороговый уровень в пределах элемента ниже, чем в его окружении. В итоге, с увеличением «размера» структурного элемента увеличиваются ширина и интенсивность разгрузки потенциальной функции и станции второй генерации не появятся.

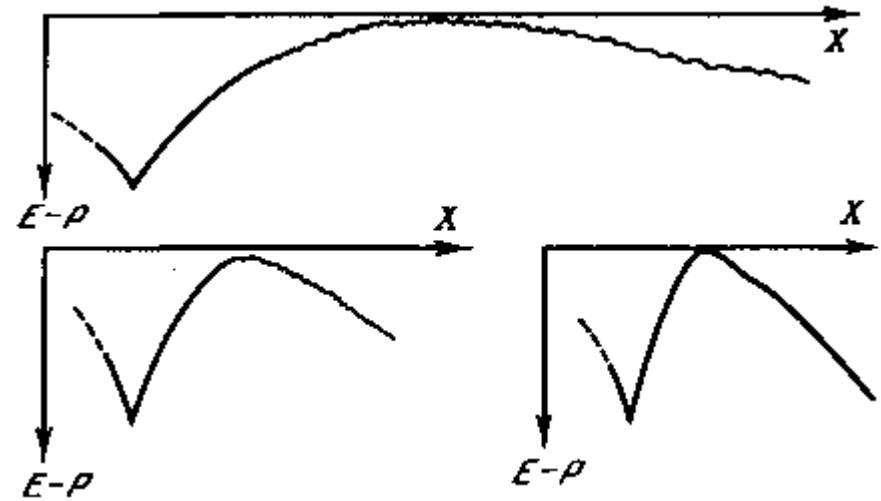


Рис. 27

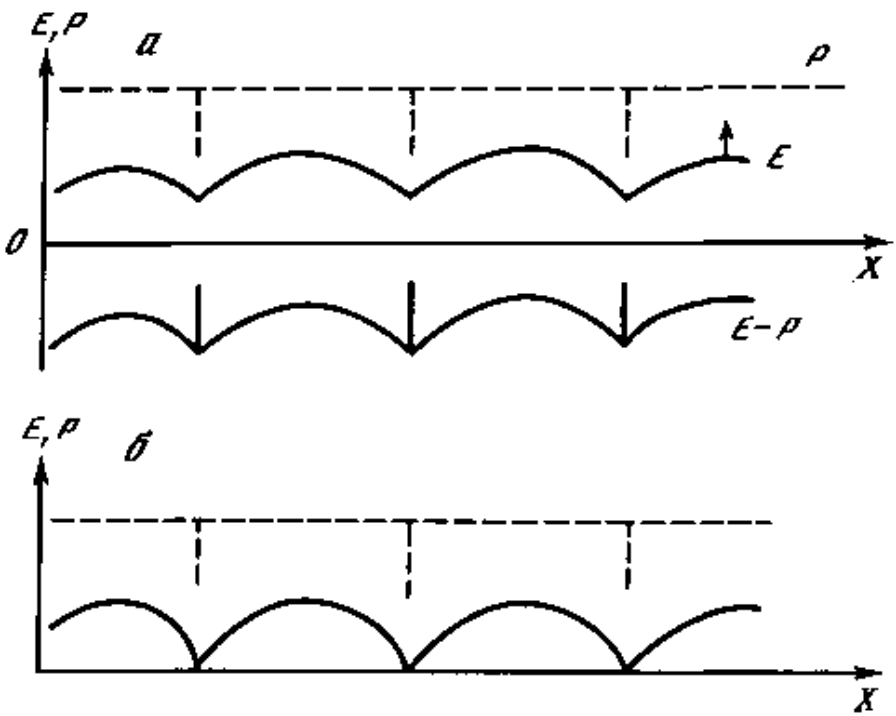


Рис. 28

Во всех рассматриваемых нами примерах предполагалось, что элементы возникают мгновенно в момент достижения условий $E_x = P_x$ и в этой точке полностью разгружают потенциал. Так, принималось, что упругий брусок разрывается мгновенно до основания, станции техобслуживания сразу начинают работать на полную мощность и т. д., т. е. за время появления этих элементов

внешние условия существенно не изменяются, а промежутки времени между моментами их заложения значительно больше, чем время формирования каждого из них. Однако элементы многих структур развиваются медленно и плавно. Рассмотрим эту ситуацию.

Пусть на некотором отрезке значения потенциала вдоль оси *x* неизменны и равномерно нарастают во времени. Кривая значений пороговой функции имеет микрошероховатость, но также в целом прямолинейна и не имеет наклона (рис. 29, *а*). Эффект смещающейся границы в этой ситуации отсутствует.

При нарастании значений потенциальной функции в какой-то точке микроминимума пороговой функции возникнет первый элемент. Если в этот момент нарастание потенциала прекратится, то этот элемент будет единственным на рассматриваемом отрезке. Примем, что его «углубление» происходит относительно медленно, зона разгрузки медленно расширяется и лишь через какое-то время она достигает своих конечных размеров (см. рис. 29, *б*). А теперь предположим, что потенциальная функция продолжает нарастать, «не дожидаясь», когда полностью сформируется первый элемент. При этом произойдет зарождение множества других элементов, причем появятся они и вблизи первого, так как он еще «не углубился» и его окружает узкая зона разгрузки. Все новые элементы будут появляться, «не дожидаясь» расширения зон разгрузки друг друга. Поэтому в итоге сформируется структура с очень плотной упаковкой (см. рис. 29, *в*). Чем выше скорость нарастания потенциала функции и чем меньше скорость углубления элементов, тем плотнее их упаковка.

В рассматриваемом примере при дальнейшем углублении элементов рисунок может развиваться двумя различными путями в зависимости от закономерностей процесса углубления элементов. Если свойства среды таковы, что по мере углубления отдельно взятого элемента скорость его углубления снижается, то в этом случае наиболее глубокие элементы (элементы, появившиеся первыми) углубляются медленно, поэтому другие, менее глубокие и потому быстрее развивающиеся элементы будут их «догонять». В этом случае первоначальные различия элементов по глубине к моменту завершения формирования рисунка уменьшатся (см. рис. 29, *г*). Соответственно первичные неоднородности, из-за которых на ранних этапах формирования структуры ее элементы могли существенно различаться по размерам, со временем затушевываются.

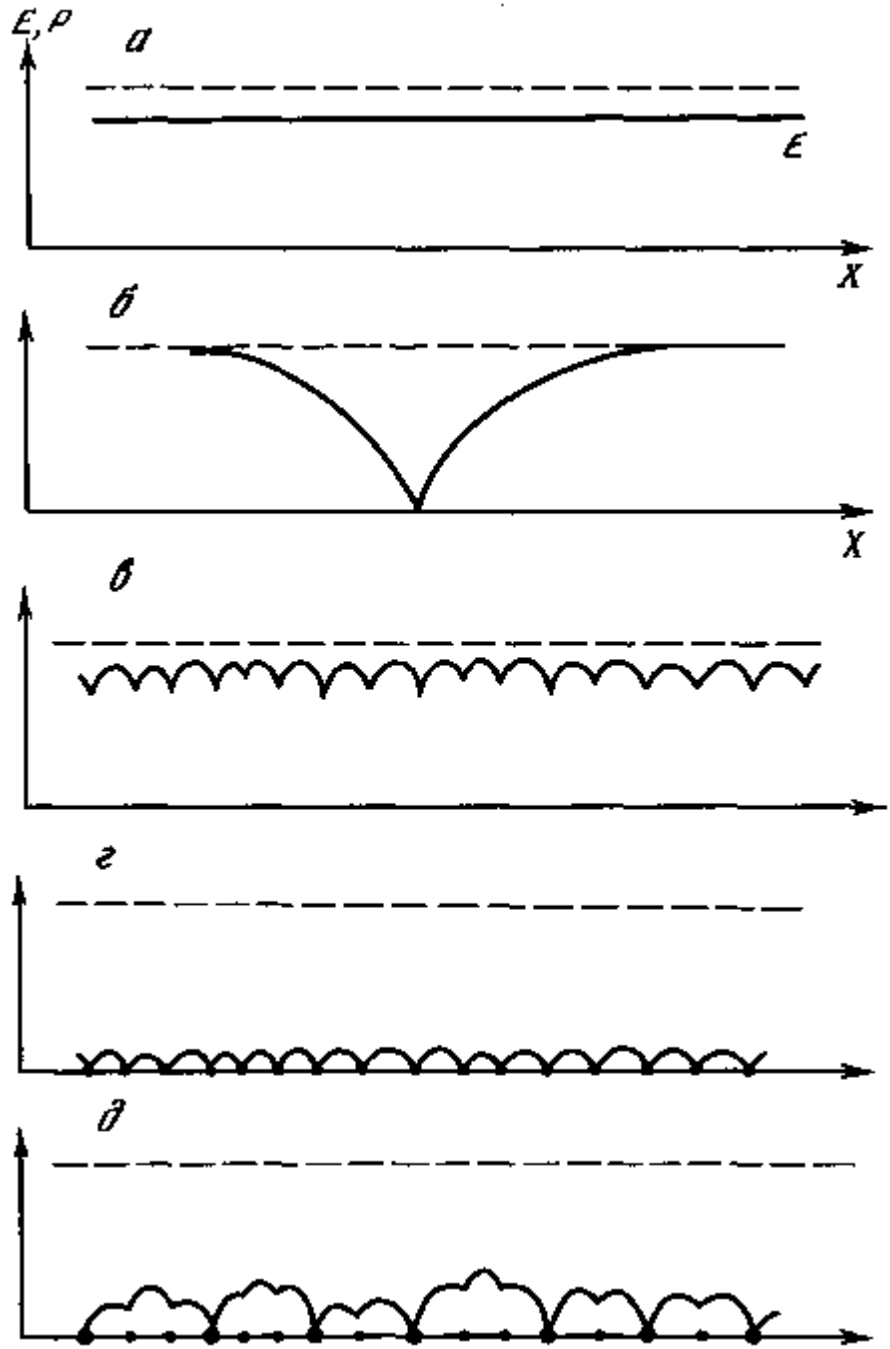


Рис. 29

Другая возможная ситуация: скорость углубления структурных элементов возрастает по мере их углубления. В этом случае элементы могут оказаться в состоянии острой конкуренции — если какой-то элемент за счет более раннего

появления опережает в своем развитии соседние, то он, разгружая вокруг себя потенциал, сдерживает этим или даже останавливает развитие соседних элементов. В итоге может возникнуть структура с несколькими «генерациями» элементов (см. рис. 29, *д*). Местоположение трещин первой генерации будет приурочено к первоначальным микроминимумам пороговой функции. Полученная структура будет отражать внешние условия, сильно подчеркивая первичные микронеоднородности внешних характеристик. Отметим, что на самом деле все элементы в этом примере, хотя они и различаются по глубине, в возрастном отношении являются элементами одной первой генерации. Соответственно у них нет строгой закономерности во взаиморасположении в отличие от настоящих элементов более высоких генераций, которые возникают посередине между элементами предыдущей генерации. Эта особенность позволяет отличать реальные и псевдогенерации.

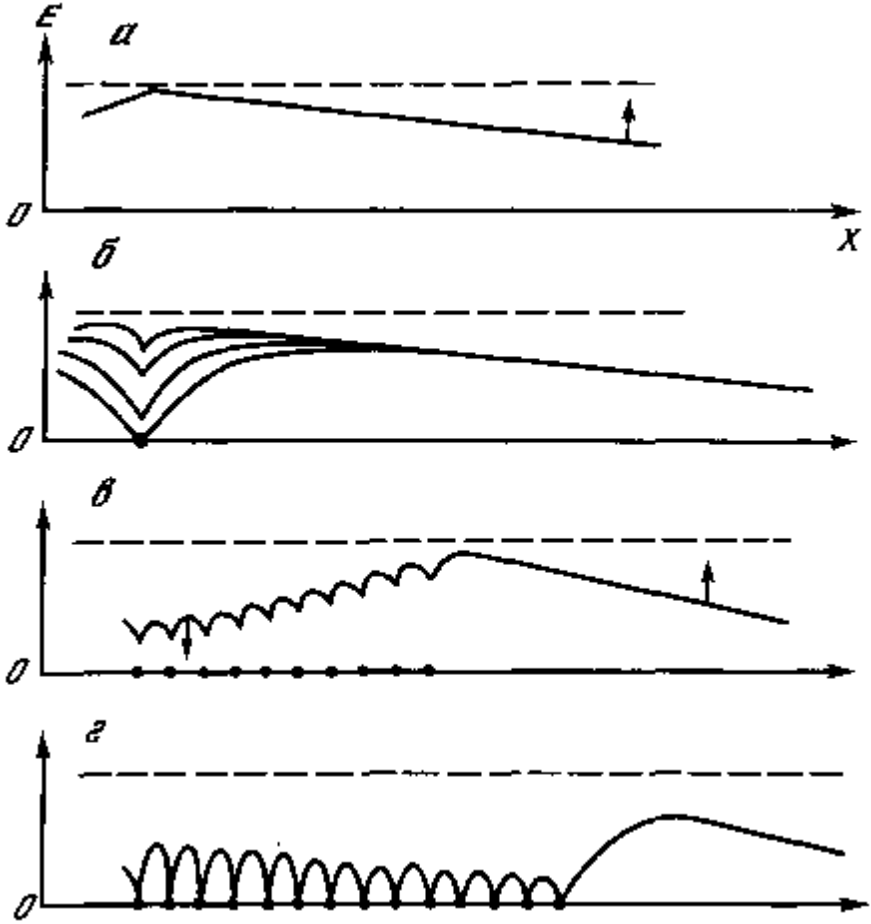


Рис. 30

Теперь рассмотрим процесс формирования рисунка при медленном углублении элементов, но со смещающейся границей. Примем, что величина порога по оси *x* не меняется, а потенциал вправо от своего максимума имеет вид наклонной прямой (рис. 30, а). После заложения в точке максимума потенциала первого элемента появляется новый максимум. Первоначально он расположен в непосредственной близости от элемента, но по мере его углубления удаляется от него (на рис. 30, б) продемонстрирована последовательность смещения максимума потенциальной функции в ситуации, если она не наращивается). Чем быстрее нарастает потенциал и чем медленнее углубляется элемент, тем быстрее новый максимум потенциала достигнет порога, а так как за короткое время максимум потенциальной функции не успевает далеко сместиться от первого элемента, то соответственно расстояние между ним и новым элементом будет мало (см. рис. 30, в, г).

При неизменном законе разгрузки и равномерной скорости смещения границы элементы будут образовываться последовательно на одинаковом расстоянии один от другого. В случае же закономерного изменения скорости смещения границы закономерно будет изменяться и расстояние между элементами. При увеличении скорости оно будет снижаться, при замедлении — расти, стремясь к расстоянию, которое наблюдалось бы в случае моментального углубления элементов. Отметим, что в аналогичном с ранее рассмотренным примером, но в условиях моментального образования элементов, скорость смещения границы на пространственную ритмичность не влияла.

Отметим также, что в приведенном примере дальнейшее наращивание потенциала приводило к формированию между элементами первой генерации новых элементов. В последнем же примере в условиях медленного роста элементов их упаковка может быть столь плотной, что появление элементов новых генераций будет невозможно. Однако здесь могут появиться псевдогенерации. По мере наращивания потенциала между элементами возникает конкуренция, и некоторые элементы, опередив другие, будут сдерживать их развитие. А могут вызвать даже их вырождение.

Рассмотрим подробнее процессы, связанные с деградацией структурных элементов и их повторным образованием. Для многих пространственных структур это обычное явление. После дождя заплывает рисунок трещин усыхания, весной заполняются водой и залечиваются морозобойные трещины, ветшают предприятия. Однако полное исчезновение структуры происходит редко, и старая структура в той или иной степени сохраняется,

определяя максимумы и минимумы пороговой и потенциальной функций. Часто в природе бывшее местоположение элемента запечатляется в виде локального минимума пороговой функции — ослабленной точки, и при повторном наращивании потенциала новые элементы возникают в местах расположения старых. Если остаточные минимумы пороговой функции в этих точках очень глубокие, то старая структура, многократно возобновляясь, будет сохраняться даже если внешние характеристики за это время существенно изменятся и будут «требовать» новой структуры.

Во всех рассмотренных примерах предполагалось, что местоположение элементов остается неизменным. Однако в природе элементы многих структур могут быть подвижными и взаимоперемещаться. Несложно показать, что при одинаковом числе элементов на равновеликих отрезках максимальная суммарная разгрузка потенциальной функции в пределах этого отрезка будет наблюдаться при регулярном взаиморасположении элементов. Если потенциальная функция отражает количество свободной энергии, заключенной в системе или проходящей через нее, т. е. энергии, способной совершать работу по изменению структуры, то нерегулярные структуры с подвижными элементами должны стремиться к регулярному расположению своих элементов — к термодинамически более равновесному, устойчивому состоянию. Поэтому смещение структурного элемента должно происходить в сторону максимальных значений потенциальной функции (рис. 31). В итоге таких перемещений структура с нерегулярным расположением элементов может со временем перестроиться в строго упорядоченную структуру с равными расстояниями между элементами. Здесь возникает вопрос — почему же сразу в этом случае не появилась упорядоченная структура? При отсутствии эффекта смещающейся границы элементы первой генерации зарождаются в случайных местах в точках, находящихся за пределами влияния ранее сформировавшихся элементов. И лишь по достижении относительно плотной упаковки зоны разгрузки двух соседних элементов перекрываются и элементы попадают в условия взаимовлияния.

Однако, вопреки определяемой вторым началом термодинамики общей направленности процессов к равновесному состоянию, строго регулярные рисунки, появившиеся в результате «взаимоутряски» элементов, встречаются редко. Это связано с тем, что упорядочение структуры требует относительно много времени. За это время некоторые элементы могут исчезнуть, и в структуре образуется новый широкий незаполненный промежуток, к которому, «ломая строй», устремятся соседние

элементы, или он заполнится множеством мелких элементов. На больших отрезках времени вероятно изменение внешних условий, и тогда, например, небольшое наращивание значений потенциальной функции приведет к тому, что внутри наиболее широких промежутков между элементами возникнут элементы новых генераций, после чего элементы, ранее «стремящиеся» сжать эти промежутки, начнут расходиться в стороны от образовавшегося здесь нового элемента, так как после его появления область наименее разгруженная становится наиболее разгруженной.

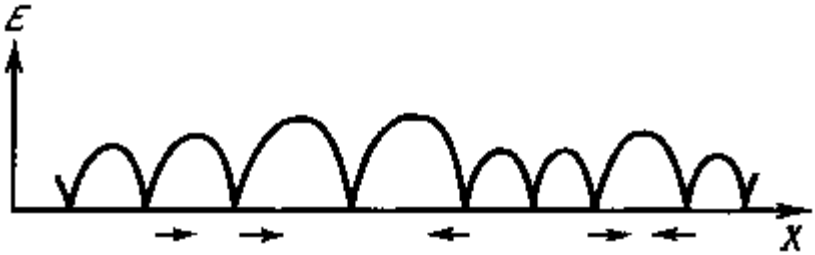


Рис. 31

Упорядочение рисунка со временем может также происходить не только при смещении элементов, но и в результате вырождения и повторного образования новых. Если исчезнувший элемент оставляет после себя не ослабленную точку, а относительно широкую ослабленную зону, то новый элемент при своем заложении может немного сместиться относительно положения предыдущего. Он в этом случае с большей вероятностью появится в месте, где потенциал менее разгружен, т. е. чаще всего из двух соседних элементов сместится к более удаленному от него.

Мы рассматривали ситуации, когда появление элемента сопровождалось разгрузкой потенциальной функции. Но возникновение элементов может сопровождаться и ростом ее значений. Например, появление на автостраде станции техобслуживания разгружает вблизи себя потребность в ремонте. Однако улучшение сервиса на трассе может привлечь водителей, что увеличит общий транспортный поток и, следовательно, на удалении от автостанции значения потенциальной функции могут возрасти, стимулируя появление новых структурных элементов. Их возникновение, в свою очередь, также усилит общий транспортный поток, что может вызвать появление как новых элементов, так и углубление первого элемента.

Или такой пример. Выдавим из тюбика на стол длинную равномерную полоску зубной пасты. Со временем она в случайных местах будет разбита трещинами усыхания. А теперь

представим себе, что мы ее покрыли тонким слоем материала, который не пропускает пары воды. В этом случае трещин не будет. Но попробуем в каком-то месте разрезать эту полоску. Через образовавшуюся щель начнет испаряться вода. Фронт усыхания будет смещаться в стороны от разреза. Это вызовет растягивающие напряжения. Разрез — это готовая трещина, поэтому возле разреза они будут разгружаться, но со временем фронт усыхания выйдет из зоны разгрузки и на ее краю образуется настоящая трещина. Она разорвет защитную оболочку и активизирует продвижение продольной волны усыхания. Когда эта волна выйдет из зоны разгрузки, вновь образуется трещина и т. д. Это пример самоорганизуемой смещающейся границы.

Саморождение новых максимумов порогово-потенциальной функции возможно и за счет снижения вблизи структурных элементов пороговой функции. Для этого необходимо, чтобы ширина зоны снижения порога была больше ширины зоны разгрузки потенциала. Например, представим себе охотничий участок, на котором есть дальний трудный путик, зверей на этом маршруте мало, и здесь не стоит ставить капканы ($E << P$). Но в какой-то его точке есть одно очень уловистое место ($E > P$). Здесь и только здесь есть смысл ставить капкан. Капкан поставлен и разгружает вероятность добычи зверей в своем окружении. Однако тропа к первому капкану уже пробита, пороговой уровень вокруг него резко снизился, и на охотничьей тропе (заодно) появляются и другие капканы.

Следующий момент, на котором следует остановиться, — это образование рисунка в условиях несимметричной относительно структурного элемента зоны разгрузки (например, тот же бесконечный брусок, приклеенный к основанию, но лежащий не горизонтально, а вертикально). Выше разрыва растягивающие температурные напряжения в нем будут усиливаться растяжением за счет веса примыкающей к разрыву части бруска, а ниже они будут компенсироваться за счет сжатия под собственным весом. В случае преобладания одного направления в движении транспорта по трассе станция техобслуживания также разгружает потребность в ремонте несимметрично — в основном в направлении преобладающего движения транспорта. Такая несимметричность отражается в рисунке. Допустим, вокруг элемента моментально возникает зона разгрузки с конечными размерами. С одной стороны, ее граница расположена на расстоянии $l_л$, с другой — $l_п$, $l_л > l_п$ (рис. 32, *а*). При относительно однородных условиях в отсутствие эффекта смещающейся границы новые элементы появятся здесь в любом случайном месте, но не ближе, чем на расстоянии $l_л$, слева от ранее

сформировавшихся элементов и не ближе, чем на расстоянии l_n, справа от них. После того как весь рассматриваемый отрезок будет перекрыт зонами разгрузки, сформируется структура, подобная изображенной на рис. 32, б. Расстояние между элементами в этом случае будет варьировать от величины, равной $l_л$, до величины $l_л + l_n$. Напомним, что при тех же условиях, но симметричной зоне разгрузки расстояние между элементами варьирует от l до $2l$. В рассматриваемом примере по рисунку может быть установлена последовательность формирования некоторых элементов. Так, из двух элементов, расстояние между которыми меньше l_n, первым образовался тот, что на рис. 32, б изображен слева от другого.

При наращивании значений потенциала в рассматриваемом примере появятся элементы более высоких генераций, но будут возникать они не в центре отрезков между элементами, как в примерах с симметричной зоной разгрузки, а ближе к тому краю, где разгрузка меньше.

При эффекте смещающейся границы расстояние между элементами с несимметричной зоной разгрузки должно определяться направлением, в котором смещается граница. Если она смещается в направлении, ширина зоны разгрузки в котором меньше, то и расстояние между элементами в этом случае будет меньше, чем при смещении границы в противоположном направлении. Если структура сформирована при смещении границ в обе стороны от первого элемента, то в таком рисунке легко определить положение первого элемента (рис. 33, а). Подчеркнем, что внешние условия по обе стороны от этого элемента могут быть одинаковыми, наклон потенциальной кривой и скорость ее смещения также могут быть одинаковы, плотность же упаковки элементов при этом различна (см. рис. 33, б).

Мы рассматривали структуры, состоящие из однородных элементов. Но структуры могут состоять и из элементов разной природы. Например, вдоль дороги могут появляться гостиницы, автозаправочные станции, посты ГАИ. Каждый из множества элементов возникает в точке, где значения его потенциала достигают значений его порога. Пороговая или потенциальная функции для каждого вида элементов могут быть независимы, тогда будут независимы и рисунки. Если же потенциалы и пороги взаимосвязаны, то местоположение одних элементов может задавать положение элементов другой природы. Простейший и часто встречающийся вариант при этом — появление одних элементов вызывает в этих точках появление порогово-потенциальных максимумов для элементов другой природы. В

этом случае обе структуры совпадут. Так, появление разломов в земной коре предопределяет местоположение речных долин. В свою очередь, глубокие эрозионные долины, как ослабленные зоны литосферы, могут способствовать заложению здесь новых разломов. На автостраде группируются различные сервисные объекты. Так, автозаправочная станция одновременно привлекает водителей и в закусочную. Если же вдоль дороги сразу во время ее строительства были построены посты милиции, то торговые точки будут возникать скорее всего посередине между ними.

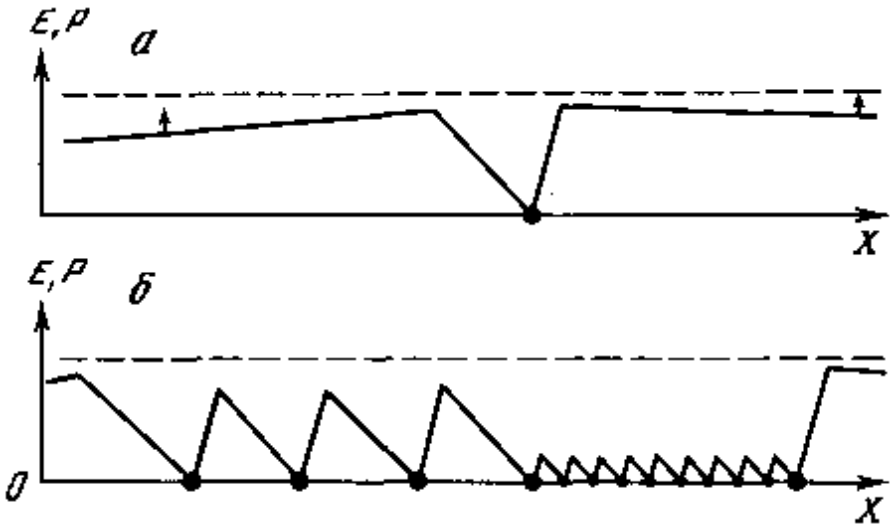


Рис. 32

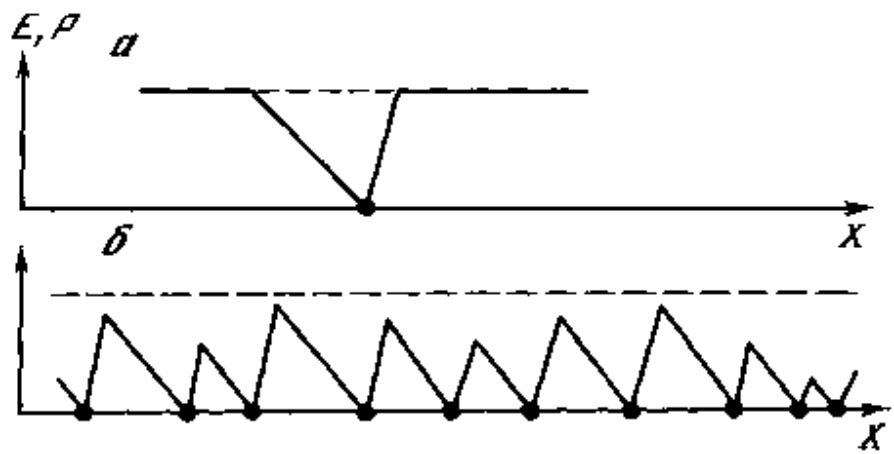


Рис. 33

На этом мы закончим рассмотрение особенностей организации одномерного рисунка. Приведенные примеры далеко не исчерпывают все их разнообразие, и многие примеры слишком

утрированы, но это начало азбуки («мама мыла раму»). Азбука показывает, как из букв получаются слова, нам же требовалось показать, что если удастся сформулировать условия возникновения элементов, установить начальные параметры пороговой и потенциальной функций и установить закон изменения этих функций при появлении элементов, то можно предсказать закономерности образующейся в итоге структуры, а можно решить и обратную задачу (она, однако, может быть зачастую неоднозначна, так как иногда схожие структуры могут появиться в различной последовательности). Еще раз отметим, что предлагаемая схема «работает» лишь после формализации и описания Р- и Е-функций. В одних случаях, например при описании физических полей, это сделать относительно легко, в других — приходится придумывать различные абстракции. Если же это не удается, то, значит, «работает» какая-то другая схема структурообразования. В последующем мы рассмотрим некоторые из них.

Мы отметили четыре механизма, обеспечивающих появление пространственно-периодических структур.

1. Наследование, повторение элементами новой структуры порядка другой структуры (повседневный пример — использование линейки для разметки бумаги).

2. «Подгонка» элементов путем их многократного смещения в положение, равноудаленное от соседних элементов.

3. Последовательное деление пространственного отрезка и вновь образующихся частей пополам.

4. Последовательное причленение нового элемента к предыдущему через равные интервалы.

А теперь подумайте, как вы поступите, если потребуется разложить бусинки на линии так, чтобы расстояние между ними было одинаково. Вы воспользуетесь одним из этих четырех способов.

В завершение раздела отметим условие, обеспечивающее закономерное пространственное взаиморасположение элементов за счет самоорганизации. Закономерное взаиморасположение — это когда элементы закономерно влияют на положение друг друга. Для этого должен быть механизм взаимовлияния, и элементы должны или находиться на расстоянии, обеспечивающем взаимовлияние, и быть подвижными, или последовательно появляться в зоне влияния предыдущих. Предыдущие элементы при этом будут задавать местоположение последующих. В обоих случаях самоорганизация — процесс, разворачивающийся во времени. Это условие необходимое, но недостаточное. Капли дождя падают последовательно, но нет

механизма взаимовлияния. В итоге в рисунке мокрых точек на асфальте нет порядка.

Орнамент из точек

Рисунки этого раздела идеализировано можно представить в виде точек, расположенных на плоскости. Это сурчины в степи, муравейники в лесу, вулканы на дне океанов и т. п. Элементы всех этих рисунков возникают там, где значения соответствующего потенциала достигают порогового уровня. В одномерном случае пространственное распределение пороговой и потенциальной функций мы графически выражали в виде линии. В двухмерном же случае эти функции можно представить некоторыми поверхностями, рельефами, у которых высотные отметки соответствуют значениям этих функций. При воздымании потенциального рельефа в какой-то момент он упрется в пороговый рельеф. В этой точке выполнится условие $E = P$ и появится первый элемент. В сложных случаях это могут быть сильно расчлененные рельефы с множеством острых вершин, гребней, впадин. В этом случае процессы самоорганизации не проявятся. Здесь появление большинства элементов будет определено максимумами потенциальной функции (вершинами ее рельефа) и (или) минимумами пороговой (ее впадинами). Поэтому будем рассматривать относительно простые внешние условия — малорасчлененные рельефы. Простейший случай — это две горизонтальные плоскости, одна из которых (потенциальная) поднимается, приближаясь к пороговой. В такой ситуации заложение первого элемента может произойти равновероятно в любом месте рассматриваемого пространства, везде одновременно выполнится условие $E = P$.

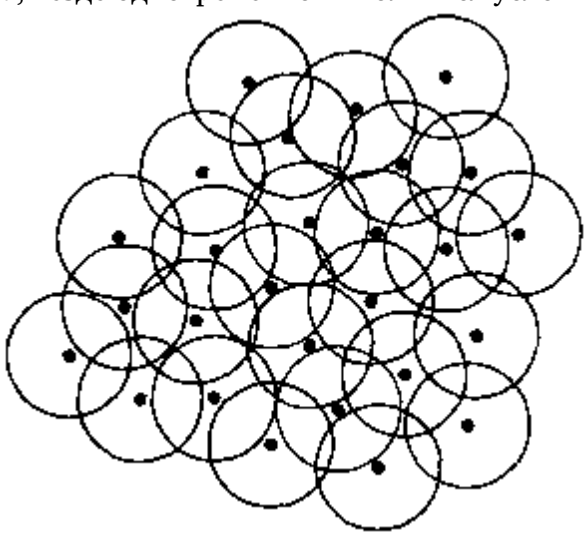


Рис. 34

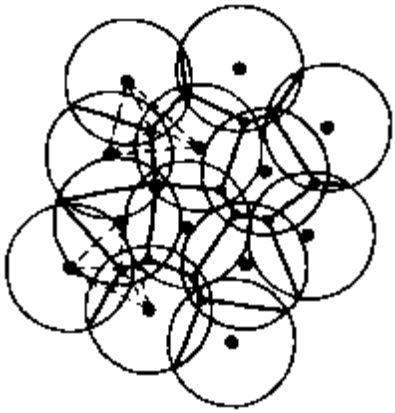
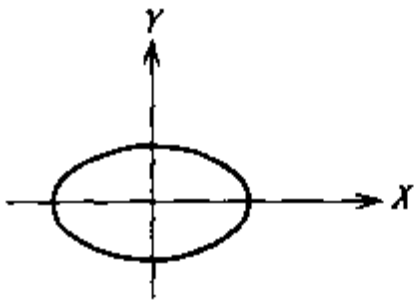


Рис. 35



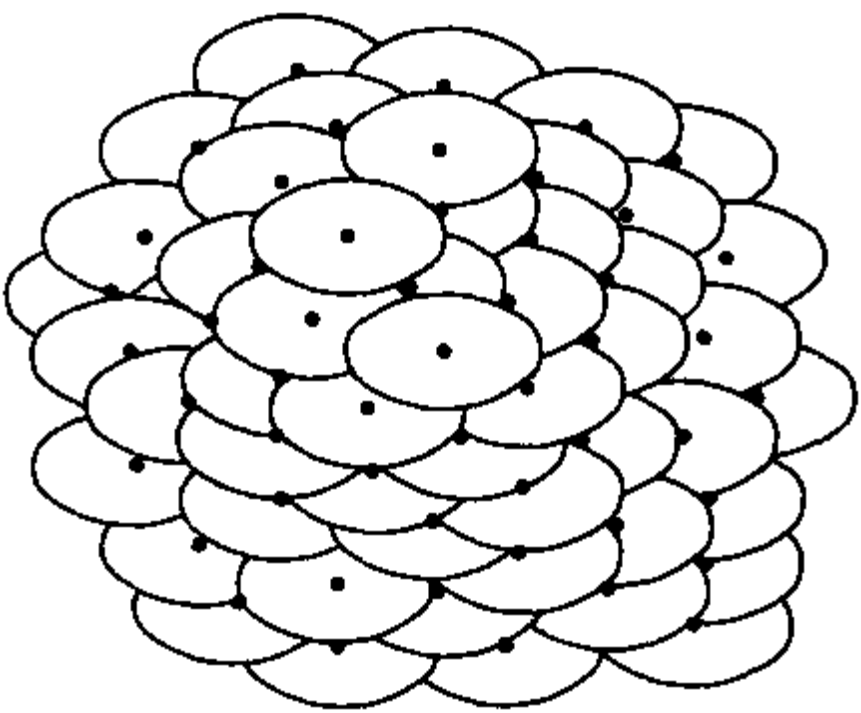


Рис. 36

Примем, что появление элемента мгновенно изменяет (разгружает) потенциальную функцию и в ее рельефе возникает впадина в виде перевернутого конуса радиусом r, т. е. зона разгрузки имеет конечные размеры и ее величина уменьшается при удалении от структурного элемента линейно. Вслед за первым элементом в случайных местах за пределами зон разгрузки будут возникать и другие структурные элементы, и в скором времени все пространство будет перекрыто их зонами разгрузки. В итоге сформируется структура, подобная изображенной на рис. 34. Расстояние между любым ее элементом и ближайшим соседним будет везде больше r, но меньше $\sqrt{3}r$.

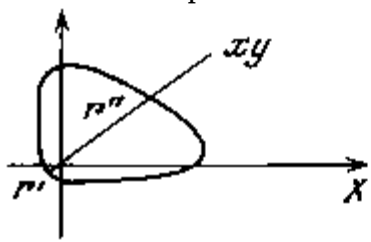
Рельеф поверхности потенциальной функции после ее разгрузки структурными элементами станет сильно расчлененным, появится множество острых вершин, соединенных седлообразными гребнями. Причем вершины будут расположены на одинаковом расстоянии от трех ближайших структурных элементов — в центре условно соединяющего их треугольника (рис. 35). При наращивании значений потенциальной функции, т. е. при воздымании рельефа потенциальной поверхности, эти вершины будут последовательно достигать порогового уровня, и в этих точках произойдет заложение структурных элементов второй генерации. Мы видим, что и в двухмерном случае элементы новой генерации закладываются на равном расстоянии от элементов предыдущей генерации — в элементарных ячейках малоупорядоченной первой генерации появляется строгая упорядоченность.

Теперь при тех же условиях зададим, что разгрузка потенциальной функции вблизи структурного элемента неравномерна по направлениям, т. е. основание конуса разгрузки не круг, а эллипс, длинная ось которого ориентирована, допустим, вдоль пространственной координаты x, а короткая — y (рис. 36). Тогда в образовавшейся структуре расстояние между соседними элементами в направлении x будет варьировать от r_x до $2r_x$, а в направлении y — от r_y до $2r_y$.

Можно задать и более сложную зону разгрузки, например такую, какая изображена на рис. 37. В этом случае расстояние между элементами в каком-либо направлении xy будет варьировать от r'_{xy} до $r'_{xy}y + r''_{xy}$.

Зададим новые условия: пороговый рельеф также плоский и горизонтальный, а потенциальный имеет гребень, по обе стороны от которого высота рельефа линейно убывает. Основание конуса разгрузки, как и в первых примерах, примем в виде круга.

Примем, что линия гребня горизонтальна. Тогда при равномерном воздымании потенциального рельефа этот гребень одновременно на всем своем протяжении достигнет пороговой поверхности и на нем возникнут элементы. Этот этап, по сути, — ранее рассмотренная одномерная задача, в которой, как помним, структурные элементы на гребне располагались один от другого на расстоянии от r до 2r. После их заложения на потенциальном рельефе вместо гребня образуется цепочка углублений, окруженная симметричными извилистыми гребнями с острыми вершинами (рис. 38). Чем дальше один от другого расположены соседние структурные элементы, тем выше образовавшиеся при этом вершины и тем ближе они расположены к линии первоначального гребня.



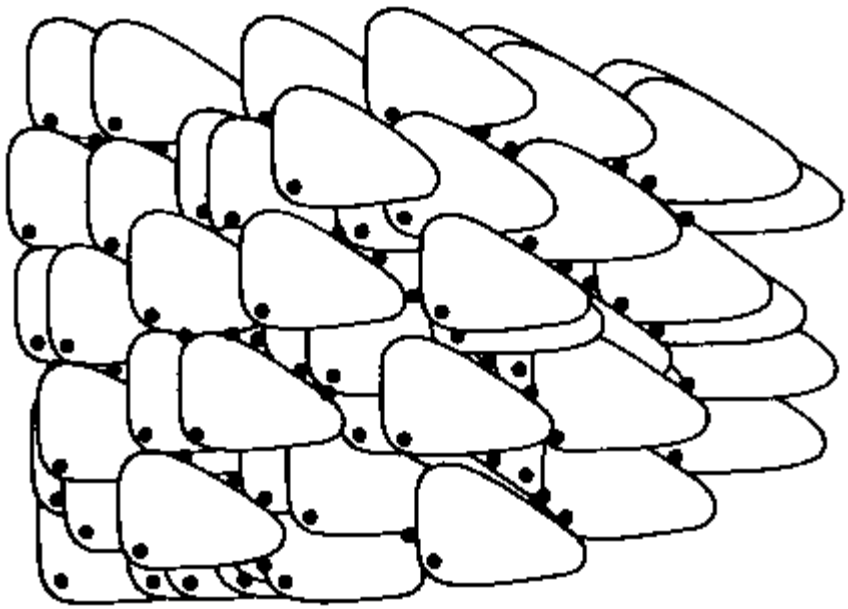


Рис. 37

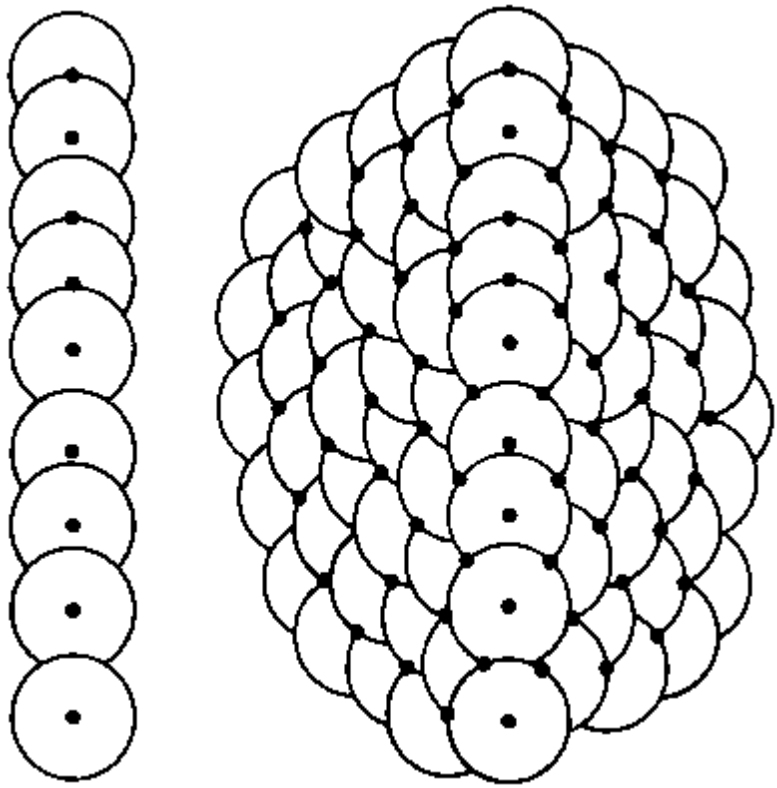


Рис. 38

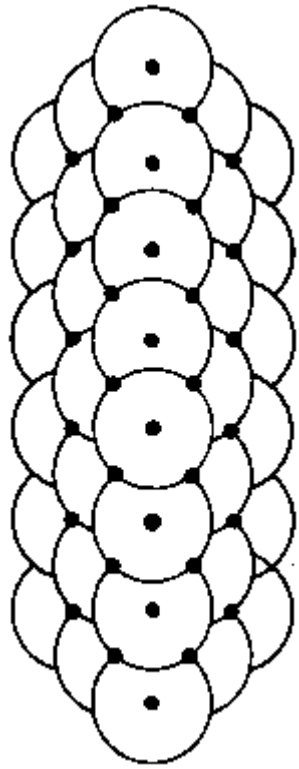


Рис. 39

При воздымании потенциального рельефа на месте этих вершин будут образовываться ряды новых элементов. Все они будут равноудалены от двух ближайших первоначальных элементов на расстояние r. Видим, что появление смещающейся границы обусловило упорядоченность в направлении ее смещения. Расстояние между соседними новыми элементами — расстояние в направлении простирания первоначального гребня — выдержанным не будет, оно может измениться от r до 2r, в этом направлении смещения границы не было. Если первоначальные элементы на оси гребня расположены относительно плотно, то и новые структурные элементы на этом участке будут в направлении гребня плотно упакованы (см. рис. 38). Если соединить отрезками элементы, то получится множество равнобедренных треугольников, заметно ориентированных вдоль оси гребня, т. е. неплотная упаковка первоначальных элементов на гребне сказывается на рисунке — он в этом районе разуплотнен в этом направлении и соответственно переуплотнен в перпендикулярном.

На первый взгляд может представиться, что структура, образовавшаяся при симметричном относительно гребня

наращивании значений потенциальной функции, будет также симметричной. На многих участках в окружении оси гребня это действительно будет так. Это позволяет при дешифровке структуры выделять первоначальную ось. Однако если расстояние между структурными элементами, лежащими на оси гребня, где-то будет больше $\sqrt{3}r$, то расстояние между двумя симметричными вершинами, появившимися между этими элементами, будет меньше r, и поэтому при возникновении на одной из этих вершин элемента другая вершина, лежащая по другую сторону гребня, попадает в зону разгрузки этого элемента и исчезает; в результате симметричный рисунок на этом участке появиться не может.

Теперь представим такую ситуацию: структурные элементы на оси гребня по какой-либо причине расположились на одинаковом расстоянии, допустим через интервал $3/2r$ (рис. 39). В этом случае равномерное наращивание значений потенциальной функции приведет к образованию строго упорядоченной структуры, у которой расстояние между элементами в направлении вдоль гребня будет везде равно $3/2r$ (см. рис. 39).

Зададим новый рельеф потенциальной функции. Пусть также будет протяженный гребень, но на нем есть вершина, при удалении от которой отметки гребня линейно снижаются. Этот рельеф в виде изолиний отражен на рис. 40, а. Сечение принятого рельефа имеет очертания ромба, т. е. перпендикулярно гребню идет второй менее выраженный гребень.

При воздымании рельефа первый элемент возникнет на вершине гребня. После разгрузки этой зоны на гребне появятся две новые вершины, равноудаленные от первоначальной на расстояние r, здесь и появятся новые элементы. В свою очередь, рядом с ними на гребне появятся новые максимумы. В итоге на бывшем гребне возникнет цепочка элементов, окруженная новыми извилистыми гребнями с острыми вершинами (см. рис. 40, б). Эти вершины, в свою очередь, также достигнут порогового уровня, и вдоль первой цепочки начнут разрастаться две новые цепочки элементов (см. рис. 40, в). В результате со временем появится строго периодичная пространственная структура, у которой элементы расположатся в вершинах равносторонних треугольников (см. рис. 40, г). Соответственно гребни потенциального рельефа составят правильную шестиугольную сеть, в узлах которой будут расположены вершины расчлененной потенциальной поверхности (рис. 41). При дальнейшем воздымании потенциально-порогового рельефа в этих вершинах произойдет заложение элементов новой генерации.

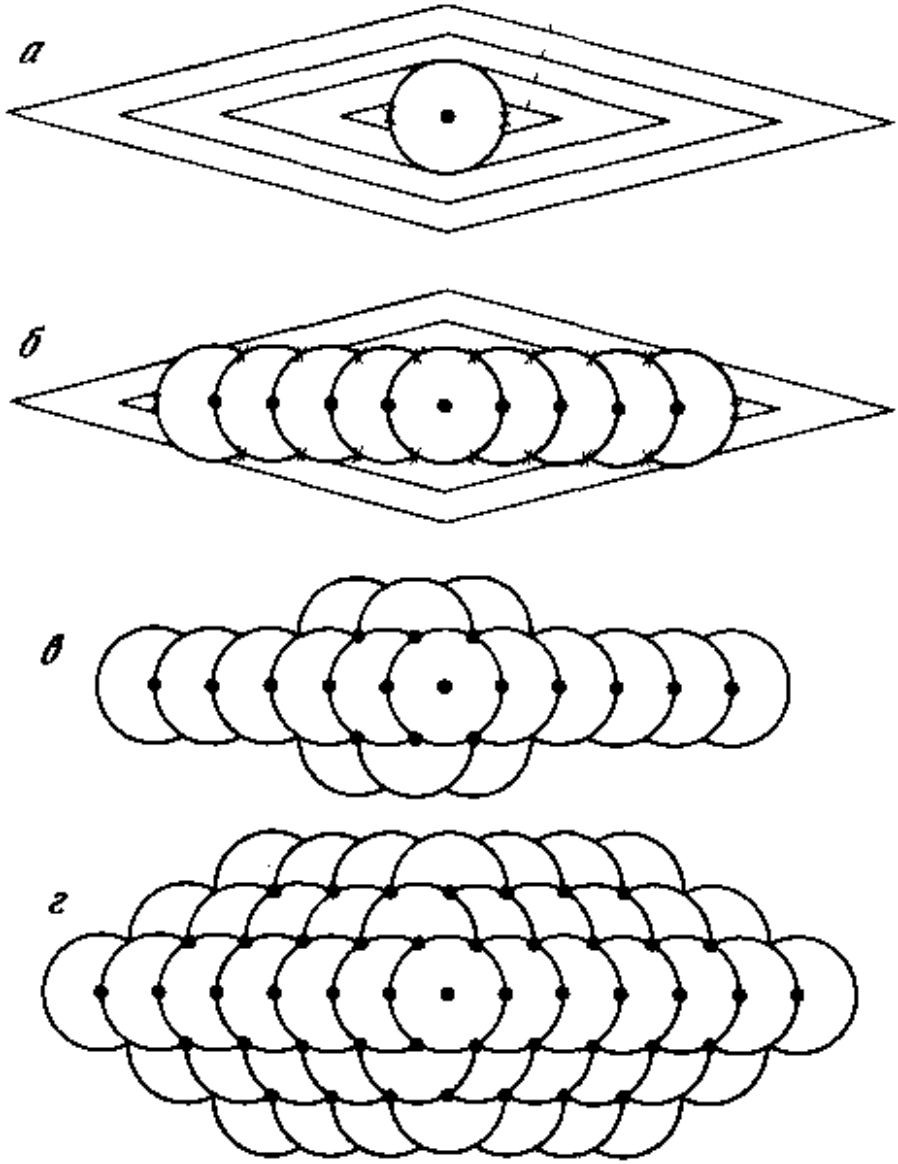


Рис. 40

Теперь при тех же условиях примем, что второй гребень хорошо выражен (рис. 42), т. е. диагонали ромба сечений рельефа сравнимы. После заложения в вершине потенциального рельефа структурного элемента в рельефе, как на основном гребне, так и на перпендикулярном ему, появятся по два максимума. На основном гребне их отметки будут выше, здесь и возникнут два новых структурных элемента.

После этого на основном гребне вновь появятся два максимума (см. рис. 42, 6 и 7), но, как это видно из рисунка, их

высота будет меньше, чем высота вершин, обозначенных цифрами 4 и 5. Поэтому новые элементы появятся в точках 4 и 5. В итоге, в отличие от предыдущего примера, где второй гребень был не выражен, появляется крестообразное взаиморасположение элементов. Дальнейшее наращивание значений потенциальной функции приведет к формированию строго упорядоченной структуры, элементы которой будут лежать в вершине квадратов со стороной r. Мы видим, что при качественно одинаковых условиях в двух последних примерах сформировались различные рисунки. Критический угол ромба, который определяет тот или иной тип структуры, равен 30°.

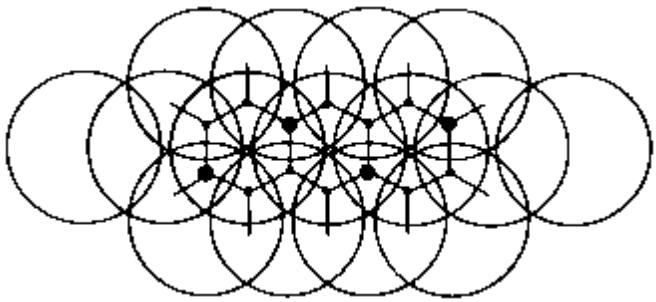


Рис. 41

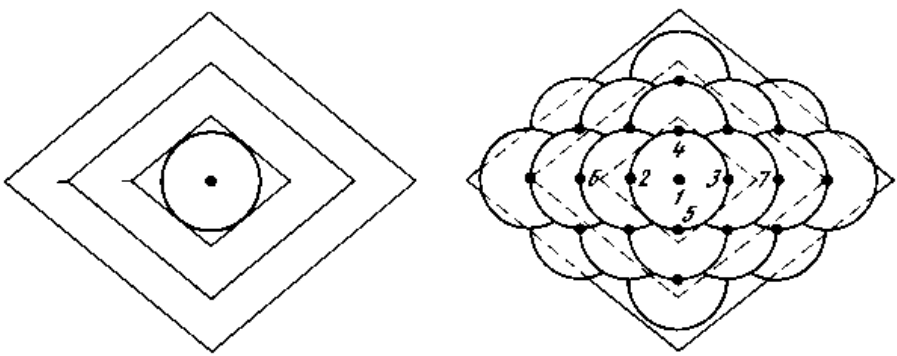
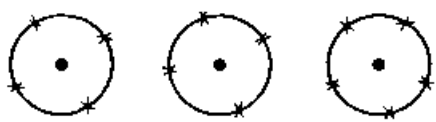


Рис. 42

Теперь рассмотрим ситуацию, когда сечения потенциального рельефа представляют собой правильные окружности. Например, рельеф представляет собой пологий правильный конус. После заложения в его вершине первого структурного элемента в рельефе сформируется одновысотный кольцевой гребень (рис. 43). Новые элементы равновероятно могут возникать в любом месте этого гребня. Их здесь при случайном заложении может возникнуть четыре—шесть (возможный вариант с тремя элементами тут же достраивается до шести). Как видно из рис. 43, варианты с первоначальными четырьмя—пятью элементами даже при симметричном расположении в итоге не приводят к

формированию строго упорядоченных структур. Лишь в направлении смещения границы структурообразования между соседними элементами расстояние выдержано и равно r. Обратим внимание на то, что если по склону холма спускается небольшой гребень, то он подчеркивается цепочкой точек (рис. 44). При рассмотренных условиях с центрально-симметричным холмом полное взаимоупорядочение рисунка происходит лишь при заложении на гребне шести элементов. Но при случайном возникновении элемента эта предельно плотная упаковка маловероятна. Однако такая ситуация возникает закономерно при отсутствии центральной симметрии потенциального рельефа (при снижении степени его симметрии) (рис. 45). В этом случае при заложении первого элемента в потенциальном рельефе возникнет кольцевой хребет, у которого в какой-то части (там, где изолинии потенциального рельефа разрежены) будет наблюдаться максимальная высота рельефа. В этой точке и произойдет заложение второго структурного элемента. После этого две новые вершины потенциального рельефа возникнут на первоначальном кольцевом гребне в точках его пересечения границей разгрузки второго элемента. Так же, в свою очередь, на этом гребне на расстоянии r от предыдущего возникнут и другие элементы (см. рис. 45).



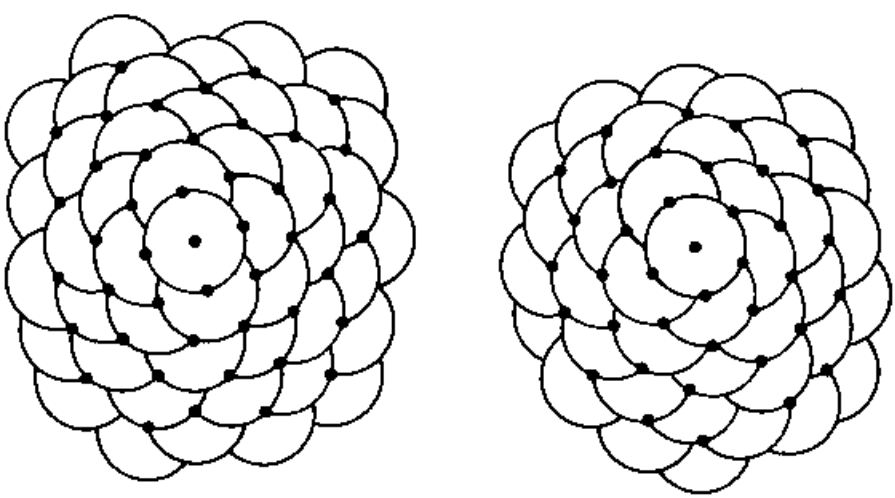


Рис. 43

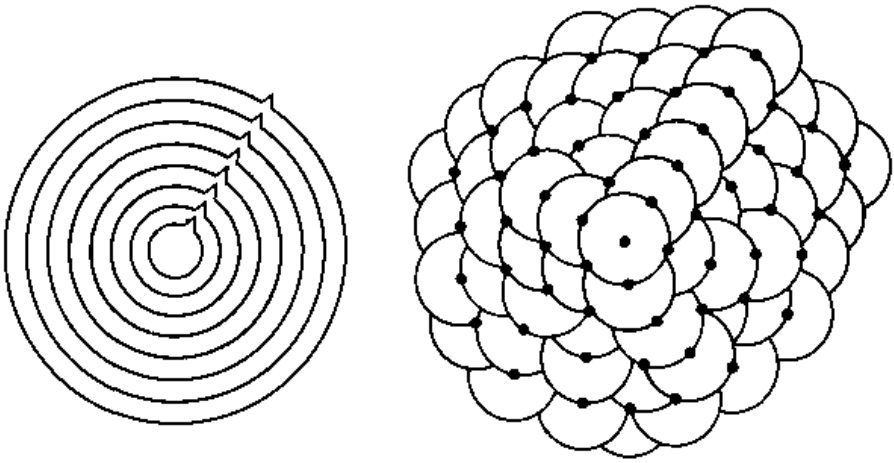


Рис. 44

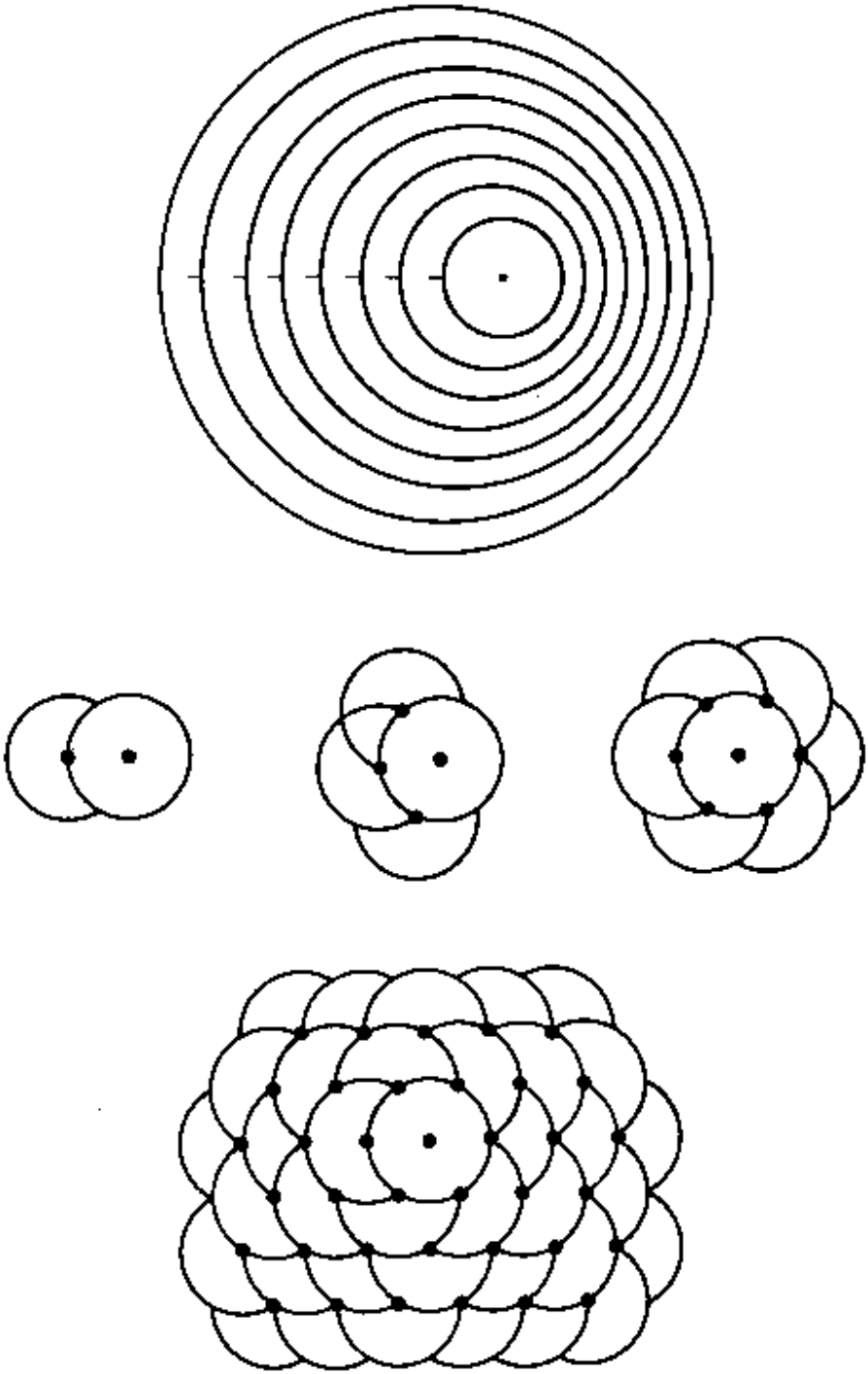


Рис. 45

Эту ситуацию можно рассматривать как смещение границы структурообразования одновременно и вдоль, и поперек склона. В

итоге элементы будут строго взаимоупорядочены. Отметим, что для появления этого рисунка достаточно нарушить центральную симметрию лишь на самой вершине. Как только сформируется первый ряд из шести точек, дальнейшее развитие структуры определено.

Можно задать ситуацию с изменением размеров зоны разгрузки в пространстве. На рис. 46 показано развитие структуры при симметричном конусе потенциального рельефа в случае, когда радиус зоны разгрузки равен расстоянию до первого элемента, т. е. он закономерно увеличивается при удалении от центра структуры. Положение четырех точек на границе зоны разгрузки первого элемента задано симметрично. Остальные элементы при воздымании потенциального рельефа сами появляются в строго упорядоченных местах — если соединить одновозрастные точки, то получим серию вписанных квадратов.

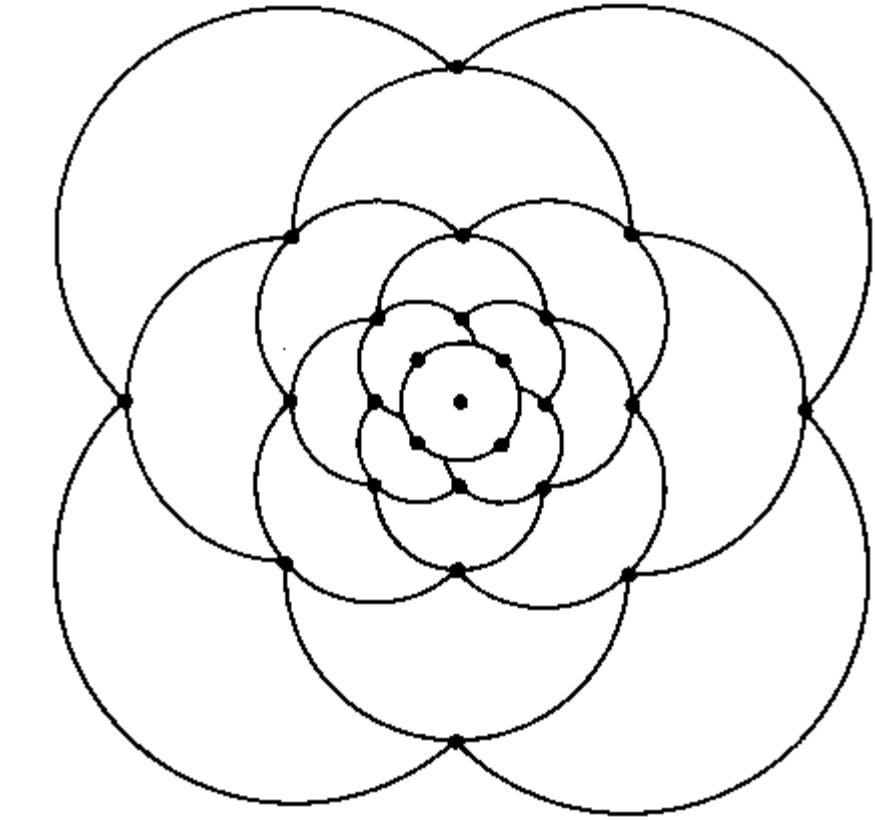


Рис. 46

Мы рассмотрели ряд примеров и видим, что для появления на больших пространствах строгой упорядоченности элементов необходимо отсутствие у элементов «выбора» точки возникновения. Она должна однозначно задаваться геометрией

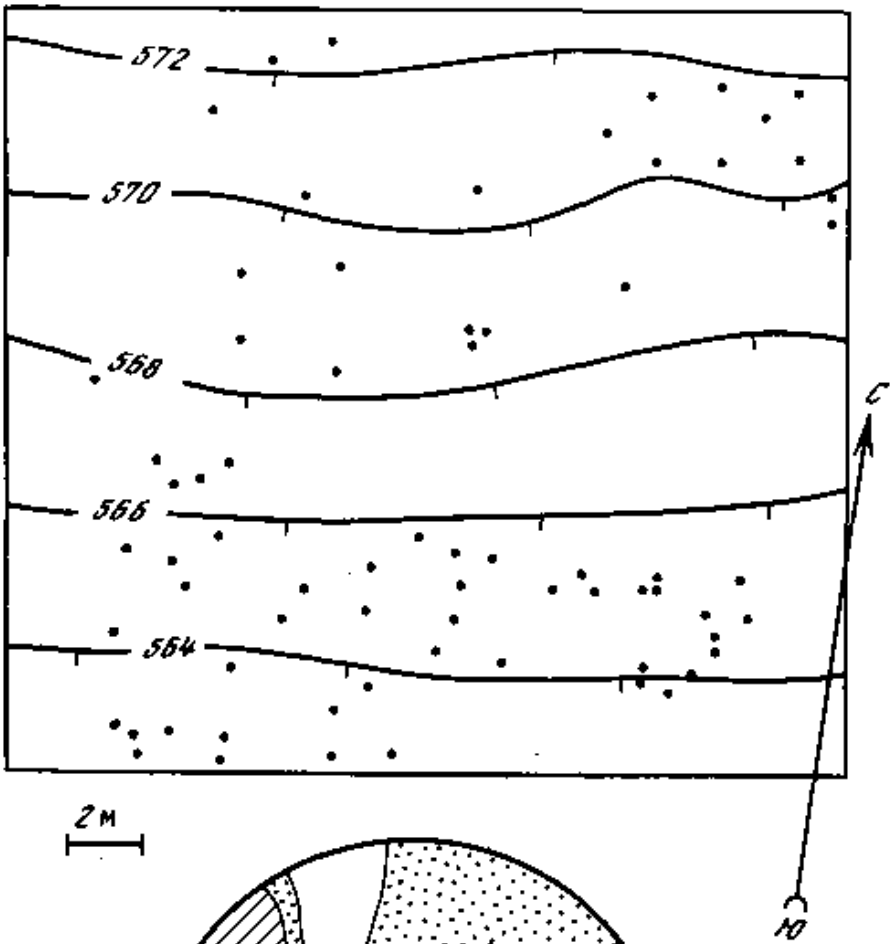
рельефов и зон разгрузки, т. е. в порогово-потенциальном рельефе на околонулевых отметках не должно быть равновысотных плато, гребней или нескольких рядом расположенных равновысотных максимумов, т. е. в однородных внешних условиях упорядоченность не появляется. Нет уверенности, что в такой ситуации она появится и в случае саморазвития элементов, когда вместе с разгрузкой потенциала вокруг элемента происходит снижение отметок порога и появляется кольцевой гребень порогово-потенциального рельефа. На этом гребне условия для заложения новых элементов будут равновероятны, и они здесь могут появиться случайно, неупорядоченно.

А теперь, оставив скучные абстракции, обратимся к конкретным рисункам и покажем, как среди хаоса можно обнаружить порядок.

Порядок в лесу

Есть ли порядок во взаиморасположении деревьев в лесу?

Но вначале давайте подберем абстрактную схему для описания леса. Его элементы — деревья — в виде проростков появляются при определенных условиях из семян, а их ветер рассыпает по почве случайным образом. Но, распуская листья и корни, растения перехватывают (разгружают) необходимые им ресурсы — свет и влагу. В условиях острой конкуренции за эти ресурсы из множества проростков лишь немногие становятся деревьями.



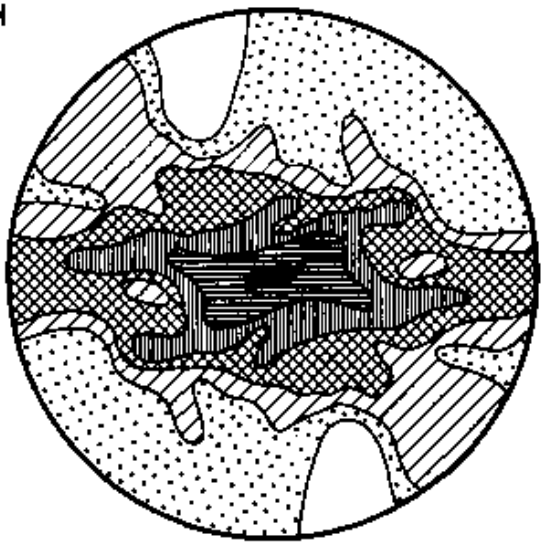


Рис. 47

В спелом лесу кроны деревьев приблизительно одного размера, значит, близок размер их зоны разгрузки. Мы уже отмечали, что в максимальной степени разгрузка потенциала происходит при регулярном расположении элементов. Это справедливо и для деревьев. Поэтому в садах их высаживают через равные промежутки, что позволяет в наибольшей степени использовать ресурсы света. Можно предположить, что и в лесу должен наблюдаться пространственный ритм, расстояние между деревьями должно быть выдержанным. Некоторые исследователи пытались этот ритм найти. Для этого измерялось расстояние между множеством соседних деревьев. Но после статистической обработки ритм не обнаруживался. Значит, он подавлен случайными процессами? А может быть, что-то не учтено? Давайте поищем порядок в лесу. На рис. 47—54 вы видите выполненные с помощью теодолитной съемки схемы участков хвойного леса. Порядок не заметен: расстояния между отдельными деревьями и их куртинами не выдержаны, скопления и группировки деревьев изометричны. Но не будем торопиться с выводами, а обратимся к теории.

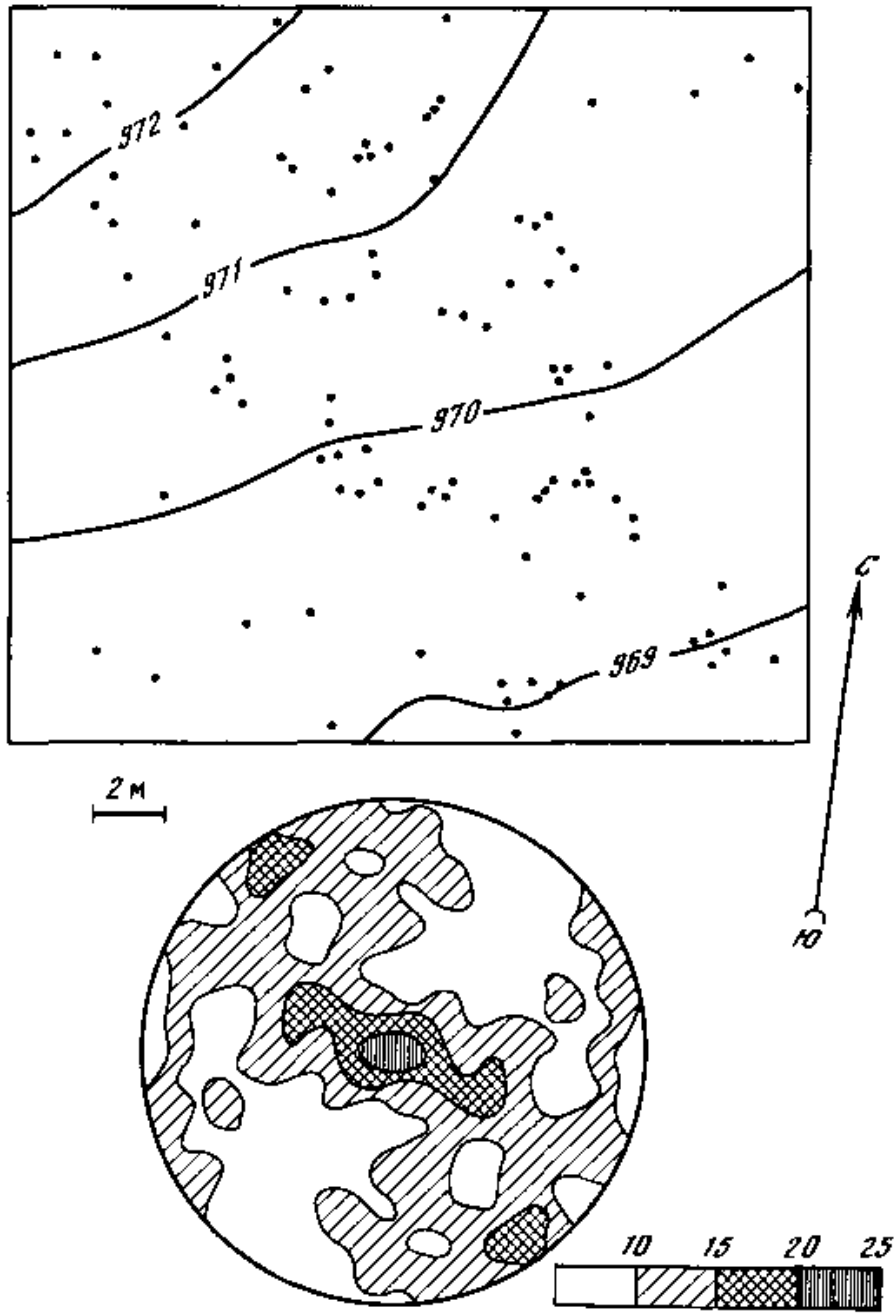


Рис. 48

Что для деревьев является потенциальной функцией и какова закономерность ее разгрузки? В засушливых областях в первую очередь это почвенная влага. Она разгружается корневой системой. В большинстве случаев зона разгрузки корневой системы проста, ее можно принять радиально-симметричной. В

условиях достаточного увлажнения важнейший ресурс — солнечный свет. В этом случае зона разгрузки явно не радиально-симметричная. Она должна иметь сложные очертания и зависеть от широты и времени года. В средних широтах Северного полушария к северу от дерева разгрузка наиболее сильная, так как дерево перехватывает наиболее мощный поток полуденного излучения, но тень в полдень короткая, и протяженность зоны разгрузки в этом направлении наименьшая. При восточном и западном положении солнца поток излучения, падающий на поверхность, меньше, но деревья, отбрасывая длинные тени, разгружают большие пространства. На экваторе в летний полдень дерево затеняет пространство лишь вокруг ствола, а за полярным кругом тень от дерева вращается вокруг него, описывая эллипс. На склонах суммарная проекция тени будет зависеть от их крутизны и экспозиции. На крутых северных склонах появятся длинные полуденные тени. А на восточных утренние станут короткими.

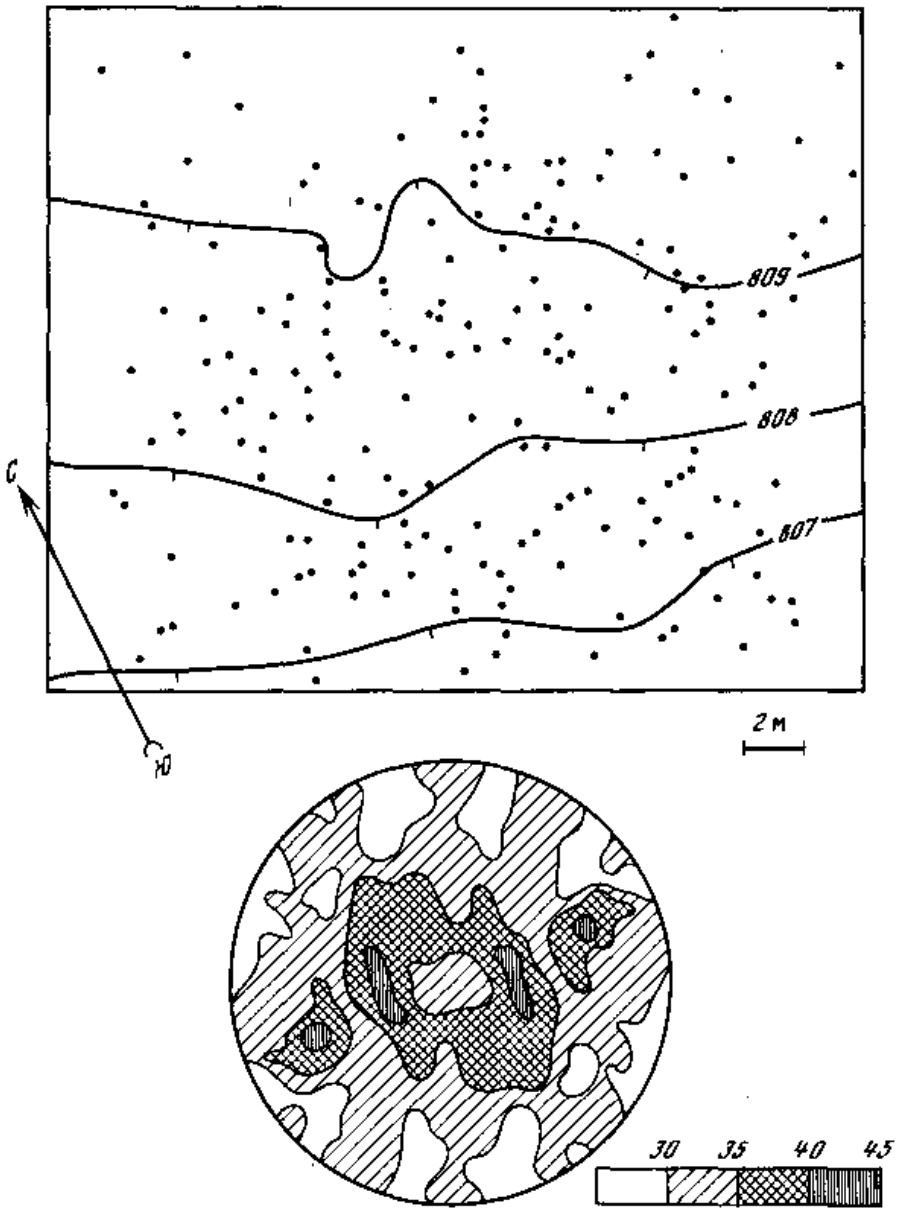


Рис. 49

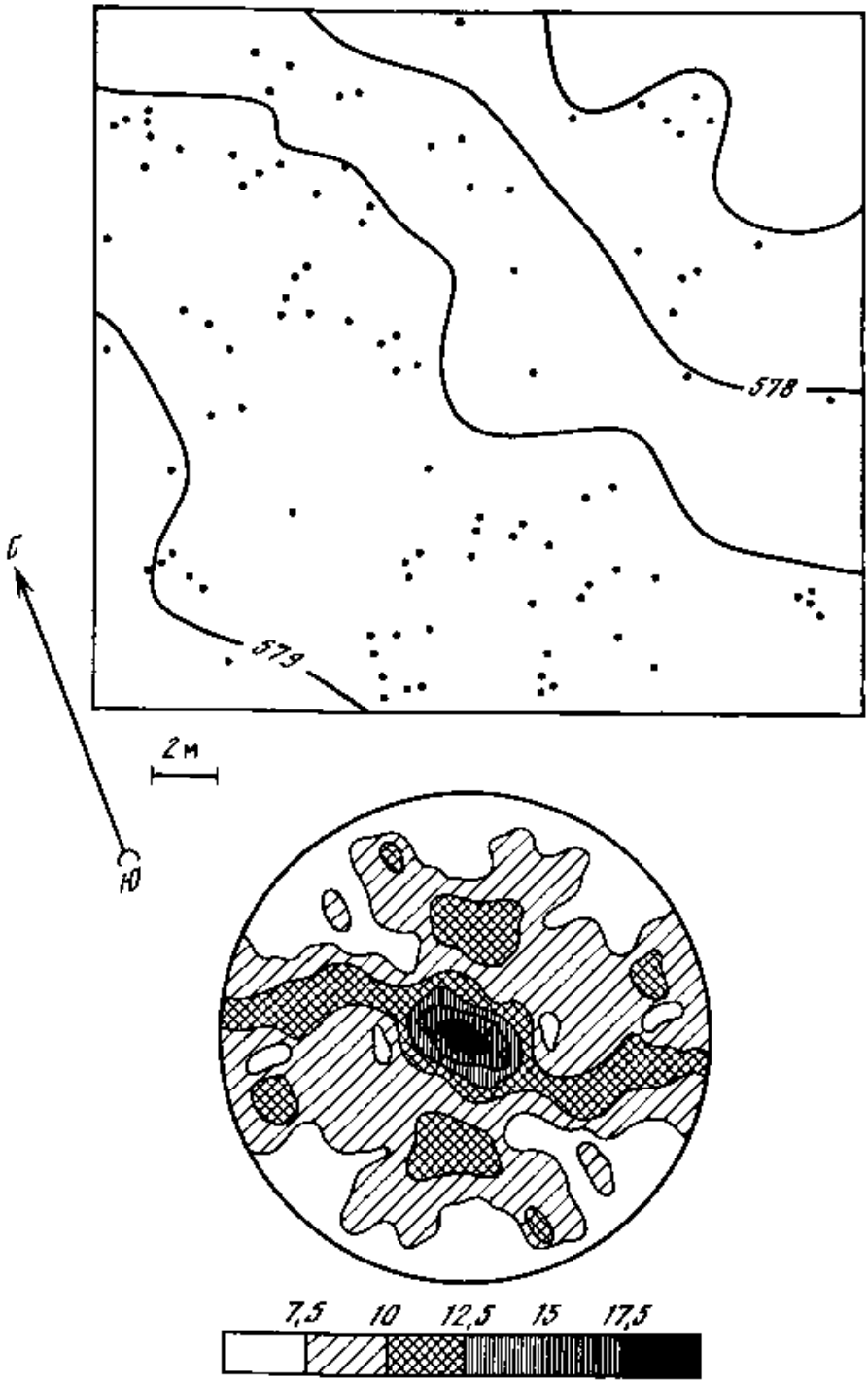


Рис. 50

Для того чтобы точно рассчитать характерную зону разгрузки дерева, кроме этого необходимо учесть конфигурацию кроны,

учесть и просуммировать изменение затененности в течение сезона, это надо сделать с учетом распределения облачности. Для каждой конкретной породы деревьев надо знать потребность в свете внутри сезона и в различное время суток. Например, у многих видов деревьев резко снижается активность фотосинтеза в полуденные часы, поэтому полуденная тень соседа для них не опасна. Как видим, зона разгрузки деревьев может иметь очень сложную конфигурацию, и, просто замеряя расстояние между ними, пространственный ритм, связанный с такой разгрузкой, не выявить. Необходим более совершенный метод.

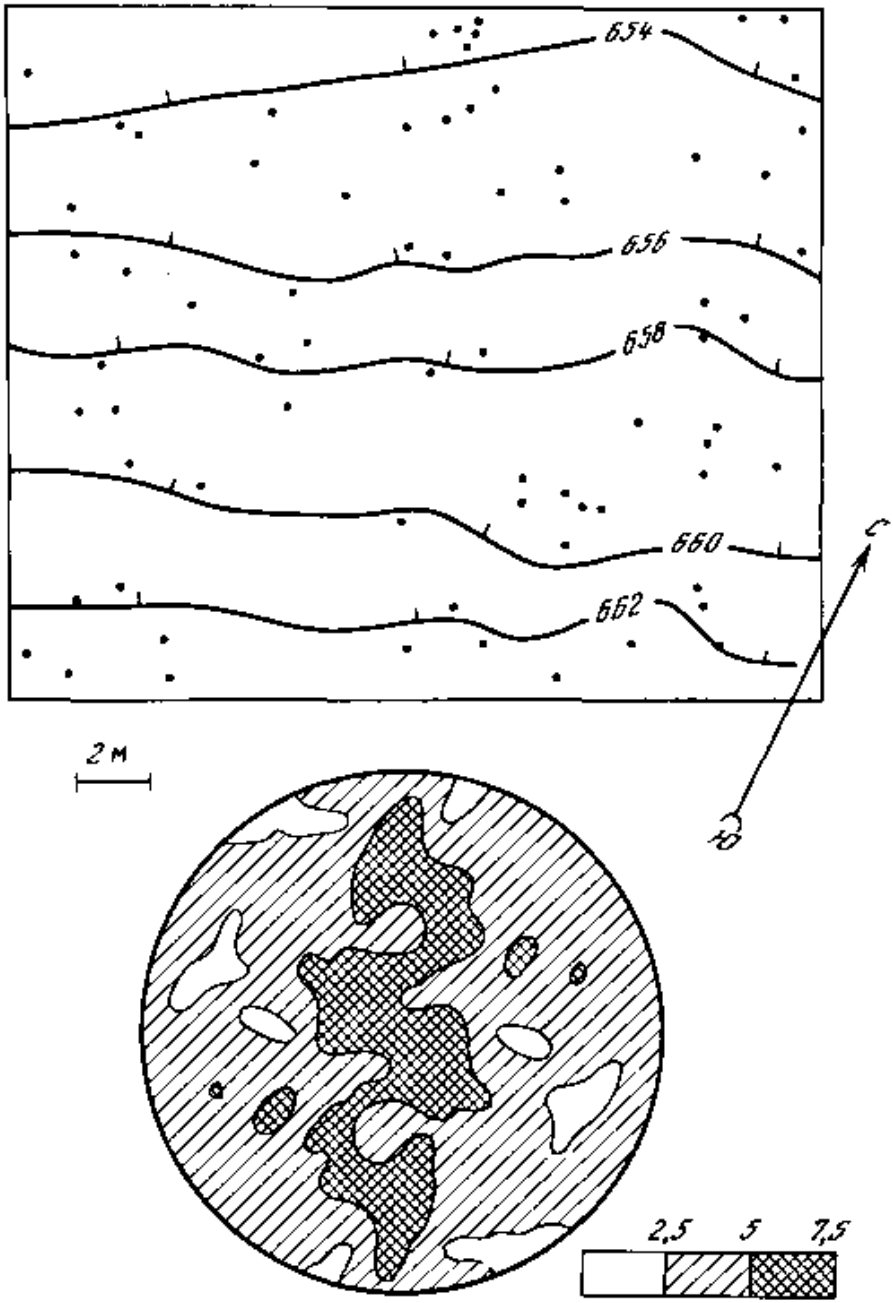


Рис. 51

Возьмем прозрачную пластиковую пленку и начертим на ней круг. Отметим на нем центр и наложим его на одну из точек на плане лесного массива. После этого на круг в виде точек переведем или переколем все другие точки плана, попадающие в круг. Затем центр круга, сохраняя ориентировку его осей

относительно сторон света, переместим в другую точку и вновь все точки плана, попадающие в круг, нанесем на круг. Эту операцию повторим для всех точек плана (деревьев). В итоге прозрачный круг окажется покрытым множеством точек. Встав в центр этого круга, вы почувствуете себя «среднестатистическим деревом». Если в каком-то направлении и на каком-то расстоянии от центра круга выявилось большое скопление точек или, наоборот, разреженный участок, то это значит, что на этом расстоянии в этом направлении от большинства деревьев расположено другое дерево или, наоборот, деревья отсутствуют. Отметим, что поле точек, возникающее на круге, должно быть симметрично относительно его центра. Поясним это. Выделим на плане две точки А и Б. Поместим центр круга в точку А и нанесем на план точку Б. Пусть она расположена в 5 м к северо-западу от точки А. После этого помещаем центр круга, сохраняя его ориентировку, в точку Б и переносим на него точку А. Она, естественно, расположится от центра круга в 5 м к юго-востоку, т. е. две появившиеся на круге точки расположены симметрично относительно его центра. То же произойдет со всеми другими точками, за исключением точек, расположенных у края плана.

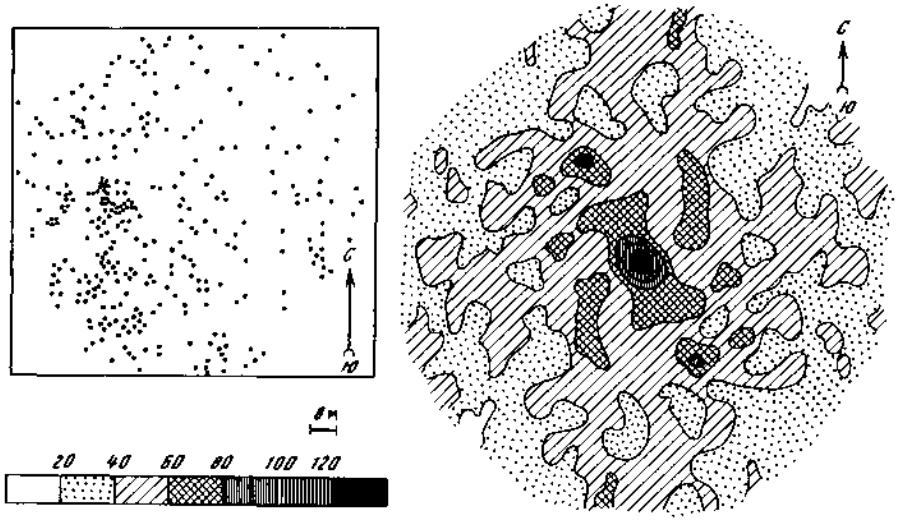


Рис. 52

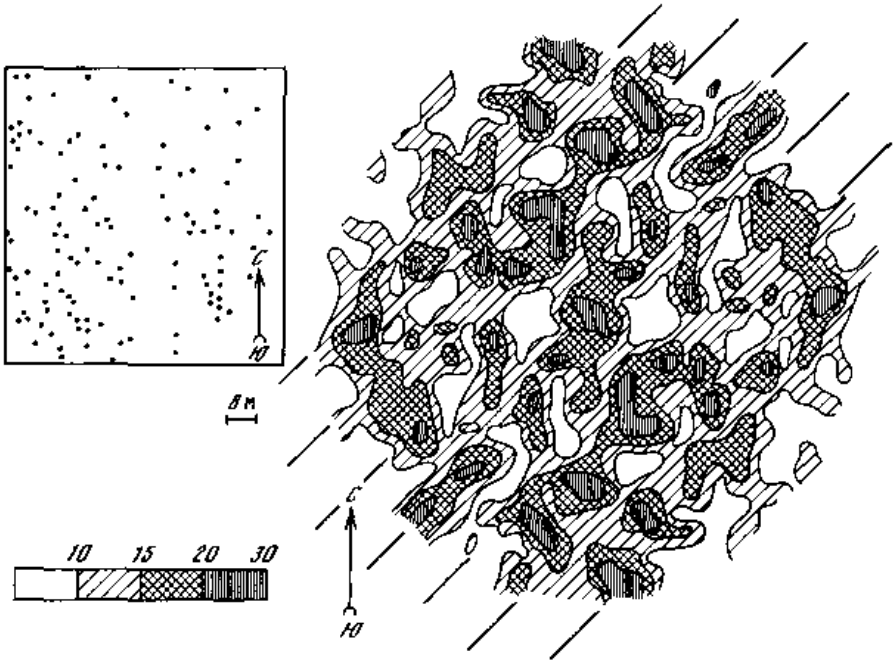


Рис. 53

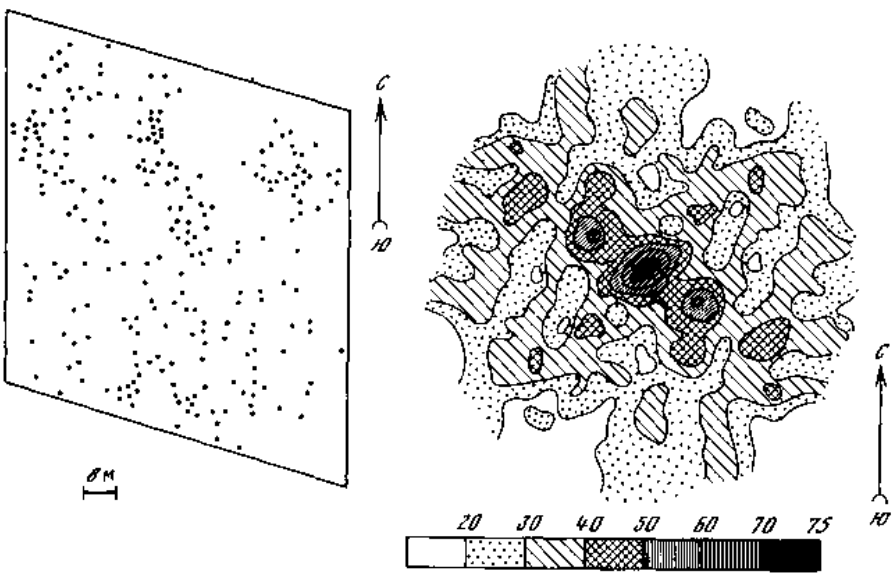


Рис. 54

Для количественной оценки плотности точек в пределах круга можно провести следующую процедуру. Расчертим круг квадратной сеткой, после чего подсчитаем число точек, попавших в каждый квадрат. Затем для симметричных относительно центра круга пар квадратов определим среднюю величину (число точек в

них должно быть одинаково, но из-за большого числа «спорных» точек, попадающих на границу квадратов, возникают расхождения). После этого проведем скользящее осреднение по четырем рядом расположенным квадратам и уже по этим значениям путем интерполяции проведем изолинии плотности точек.

По этой методике были построены структурные схемы для восьми участков леса. Пять из них (рис. 47—51) расположены на склонах разной крутизны и экспозиции в районе хр. Мяо-Чан (бассейн Амура), 51° с. ш. Диаметр круга на местности соответствовал 15 м, шаг квадратной сетки — 0,75 м. Шаг маловат, тем не менее на четырех схемах виден ритм с шагом 2—3 м. На первых трех склонах южной экспозиции (рис. 47—49) видно преимущественное взаиморасположение деревьев в направлении запад—восток. А на рис. 50, 51 выделяется упорядоченность в «диагональных» направлениях по отношению к сторонам света.

Три других участка — это лиственничный лес на полого наклоненной к югу поверхности в низовьях р. Колымы (69° с. ш.). При этом участок, изображенный на рис. 53, — часть участка, изображенного на рис. 52, а третий участок (рис. 54) примыкает к нему с запада. Диаметр круга на рис. 52 и 53 в масштабе местности равен 40 м, на рис. 54 — 30 м. Шаг квадратной сетки для этих схем — 1 м.

При общем взгляде на эти структуры более заметна упорядоченность в «диагональных» направлениях по отношению к сторонам света. Здесь виден пространственный ритм. Так, на рис. 54 видно, что на линии, проходящей через центр в направлении северо-запад — юго-восток, максимумы и минимумы чередуются через 5 м. С тем же ритмом чередуются они и в направлении северо-восток — юго-запад. На рис. 53 можно даже попытаться выделить решетку, в которую упакованы максимумы и минимумы. Например, центр структуры в направлении северо-восток — юго-запад пересекает гребень, на котором через равные интервалы расположены девять максимумов также через 5 м (центр рисунка — это максимум, сюда попали все точки плана). Параллельно этому гребню по обе стороны от него на расстоянии порядка 6 и 12 м также выделяются гребни. Эти гребни разделены полосами минимумов. Соответственно многократное ритмичное чередование максимумов и минимумов наблюдается и вкрест этим гребням. Ритмичность проявилась и на рис. 52. Плотное скопление молодых деревьев в западной части участка ее не затушевало.

Интересно, а как упакованы деревья в тропическом лесу?

Наверно, в направлении север—юг они стоят друг к другу ближе.

Мы уже отмечали, что угадать зону разгрузки деревьев трудно, но ее можно измерить в лесу, и тогда для каждой породы, для каждой широты и экспозиции склона можно выбрать оптимальное взаиморасположение деревьев, при котором ресурс освещенности территории будет использован в наибольшей степени, т. е. можно предложить оптимальную мозаику лесопосадок, фруктовых садов.

Параллельные и расходящиеся

В этом и последующих разделах мы рассмотрим особенности формирования рисунков из линий на плоскости. Это могут быть различные сетчатые, ячеистые, древовидные рисунки, например сеть трещин, рисунки речной сети, транспортных магистралей и т. д.

Для этого класса структур различные механизмы формирования также можно свести к описанию закономерностей изменения абстрактных потенциальной и пороговой функций. Пороговая и потенциальная функции, рассматриваемые в предыдущих разделах, являлись скалярами, в любой точке пространства они могли быть охарактеризованы одним числом. Поэтому функции легко представлялись одномерными или двухмерными рельефами. В случае же с линейными элементами в каждой точке величина потенциальной функции в разных направлениях может быть различной — потоки напряжений нельзя охарактеризовать, не задав направлений.

Например, как появляются элементы гидрографической сети — эрозионные ложбины? Допустим, что но плоскому склону в направлении его уклона стекает распластанный водный поток. Как только в каком-то месте его скорость достигает величины, равной размывающей, на склоне образуется канавка, ложбина, она перехватывает поток и из-за этого еще больше углубляется — возникает линейный структурный элемент, который в своем окружении «разгружает» распластанный поток, стекающий по первоначальному уклону в этом направлении.

Другой пример — образование тропинок. Предположим, что в черте города расположен большой ровный пустырь, заросший невысокой травой. Этот пустырь постоянно в разных направлениях пересекают люди. Одно из направлений движений преобладающее. Пешеходы приминают траву, но, пока их поток относительно небольшой, трава успевает восстановиться и сплошность растительного покрова не нарушается. Но допустим, что со временем людской поток увеличивается до критической величины, и в какой-то части пустыря, где поток наиболее интенсивный, растительность начинает деградировать — появляется выбитая полоса. По выбитому месту идти легче, поэтому пешеходы, движущиеся в направлении, параллельном этой выбитой полосе, увидев ее, сворачивают и идут по ней. Происходит еще большая концентрация потока — образуется тропинка, которая на ширину видимости разгружает параллельный себе поток пешеходов.

Во многих случаях и для величины пороговой функции необходимо задавать направление. Например, прочность на разрыв у многих материалов в различных направлениях может сильно различаться (пример — деревянная доска трескается вдоль, а торец бревна — по радиусу или окружности). Соответственно трещины в таких материалах будут возникать не вкрест направлению максимальных растягивающих напряжений, а в том направлении, где в первую очередь напряжения достигнут величины прочности, наблюдаемой в этом же направлении.

У линейных элементов может быть специфична и разгрузка потенциальной функции. Вблизи элемента величина потенциала может разгружаться во всех направлениях, а может преимущественно или (лишь) в каком-то одном. Все это значительно усложняет анализ, формализацию и графическое выражение механизмов формирования рисунка. Тем не менее попытаемся это сделать. Оговорим, что составляющую потенциала для какого-то направления в точке пространства будем считать мерой возможности появления в данной точке структурного линейного элемента, ориентированного в этом направлении. В ряде случаев потенциал можно задать как вероятность появления в этом направлении элемента. Отметим, что направление, в котором наш потенциал максимален, может не соответствовать направлению реальных параметров. Так, например, трещины возникают в направлении, перпендикулярном направлению максимальных растягивающих напряжений.

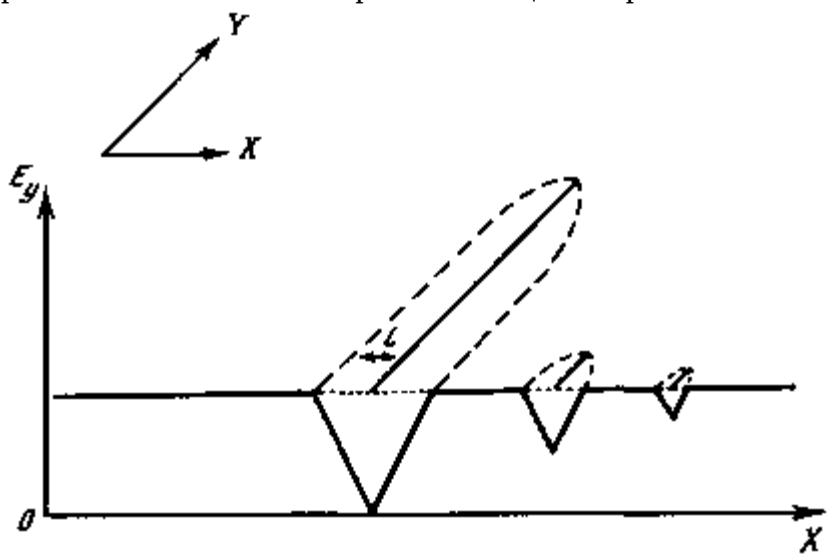


Рис. 55

Конкретные примеры мы пока рассматривать не будем, а

сразу начнем с абстрактных схем. Будем задавать различные варианты пороговой и потенциальной функций, их динамики и условий разгрузки, получая в итоге различные рисунки.

Начнем наши примеры со структур, возникающих на плоскости *xy* в резко анизотропном потенциальном поле. Примем, что потенциал везде ориентирован в направлении *y*, во всех других же направлениях потенциал равен нулю. Пороговую функцию при этом зададим скалярной величиной; примем, что во всем рассматриваемом пространстве она одинакова. При этих условиях структурные элементы будут возникать там, где величина потенциала достигнет величины пороговой функции. Элементы при этом будут всегда прямыми линиями, ориентированными вдоль направления *y*. Примем, что на линии элемента разгрузка потенциала полная, ширина зоны разгрузки вокруг линейного элемента конечна и не превышает *2l*, при этом величина разгрузки при удалении от элемента изменяется по линейному закону (рис. 55). Примем, что в вершине структурного элемента (у конца линии) ширина зоны разгрузки и ее «глубина» равны нулю и лишь на каком-то удалении от конца, допустим на расстоянии порядка *2l*, она достигает конечной ширины и «глубины» — полностью разгружает потенциал (см. рис. 55).

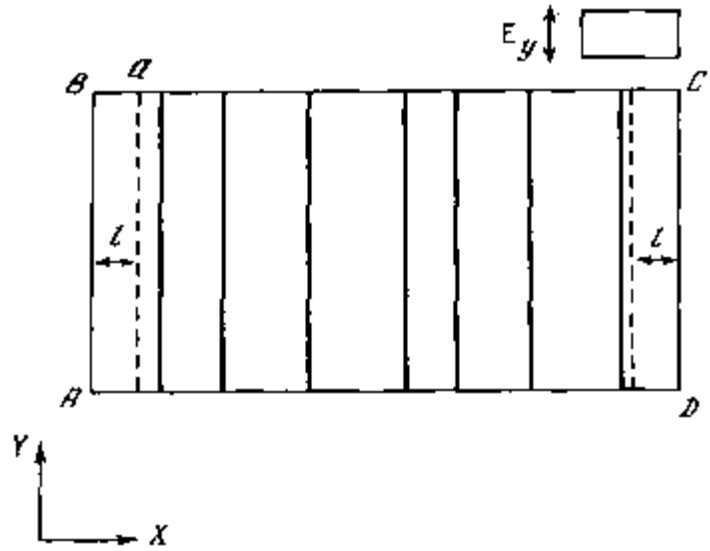
В вершине структурного элемента возможно увеличение значений потенциала или снижение значений пороговой функции — «ослабление прочности», «концентрация напряжений». Из-за этого элемент (линия) может «по инерции» проникать в область, где $E_y < P$. Этот вариант рассмотрим позже, а пока примем, что вершина структурного элемента не может проникать в область пространства, где $E_y < P$.

Рассмотрим особенности формирования рисунка в пределах плоскости, ограниченной прямоугольником с вершинами A, B, C, D. Примем, что его стороны AD и BC не оказывают влияния на потенциальную функцию, а стороны AB и CD разгружают ее, как будто они являются структурными элементами. Пусть в пределах выделенного контура величина потенциальной функции будет везде одинакова.

Начнем наращивать потенциал. Его рельеф параллелен пороговому рельефу, поэтому условие $E_y = P$ возникнет одновременно по всему контуру. Тогда первый структурный элемент (линия) может возникнуть в любом месте. Допустим, что структурные элементы развиваются моментально, тогда элемент быстро пересечет весь контур вдоль себя и в полосе шириной *2l* разгрузит потенциал. Новый элемент образоваться здесь уже не сможет. За пределами же зоны разгрузки первого элемента в случайных местах будут возникать новые элементы. В итоге

возникнет структура, состоящая из параллельных линий, расстояние между которыми изменяется от l до $2l$ (рис. 56, а). Если продолжать наращивание потенциала, то посередине между линиями первой генерации, в первую очередь в наиболее широких полосах, будут возникать линии второй генерации (рис. 56, б) и т. д. Во всех последующих рисунках в правом верхнем углу мы графически будем изображать условия задачи. Прямоугольник — это «карта» рельефа максимальных значений первоначально заданной потенциальной функции. Рельеф будет показан изолиниями и берг-штрихами, показывающими уклон. Если на карте нет изолиний, значит, рельеф горизонтальный. Рядом мы будем изображать индикатрису потенциала, показывающую относительные значения потенциала в координатах рисунка.

Теперь предположим, что элементы развиваются медленно. Тогда по всему полю в случайных местах, определяемых микрошероховатостью, будут возникать короткие растущие линии (штрихи). Пока они короткие (меньше $2l$), их окружает узкая зона разгрузки, поэтому новые элементы могут возникать вблизи с предыдущим. Появление новых элементов и удлинение первоначальных приведет к тому, что вся поверхность перекроется зонами их разгрузки и развитие структуры остановится (рис. 57, а). Если после этого продолжать наращивать значения потенциала, то сразу же начнется удлинение элементов — они будут взаимопроникать в зону разгрузки других, встречных элементов. Возникнут условия конкуренции. Если встречаются два коротких элемента (меньше $2l$) разной длины, то у более длинного зона разгрузки глубже, поэтому он будет проникать в зону разгрузки короткого элемента быстрее, чем короткий в его зону разгрузки. В итоге за счет преимущественного развития наиболее длинных элементов структура, изображенная на рис. 57, а, трансформируется в структуру, подобную приведенной на рис. 57, б. Если при соблюдении условия конечности максимальной ширины зоны разгрузки и дальше продолжать наращивание потенциала, то в итоге можно добиться того, что все элементы пересекут массив. После этого наращивание потенциала приведет к возникновению элементов второй генерации. Если же элементы могут постоянно углубляться и расширять зону разгрузки, то в условиях конкуренции мелкие элементы могут вырождаться.



б

Рис. 56

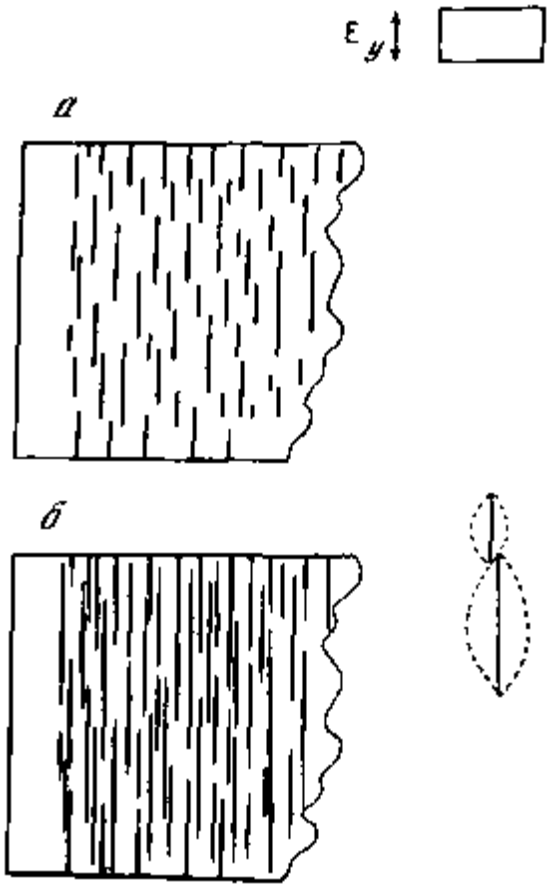


Рис. 57

Структуры, подобные изображенной на рис. 51, б, могут возникнуть и без дополнительного наращивания потенциала, если в вершине линий происходит его концентрация. За счет этого элементы могут проникать в зоны разгрузки других элементов.

Теперь для того же массива ABCD зададим другую геометрию поверхности потенциального рельефа. Он также будет плоским, но будет иметь общий наклон от линии AB к CD. В этом случае равномерное наращивание значений потенциала приведет к тому, что в какой-то момент на границе зоны разгрузки стороны AB выполнится условие $E_y = P$. Здесь возникнет элемент. После этого на расстоянии l от этого элемента (на краю его зоны разгрузки) в потенциальном рельефе возникнет новый горизонтальный гребень, на котором при дальнейшем наращивании значений потенциала появится новый элемент, и т. д. В итоге возникнет структура, состоящая из параллельных линий, удаленных друг от друга на расстояние l. В наиболее

«старой» части структуры при этом возможно появление элементов более высоких генераций (рис. 58).

Если задать, что структурные элементы «углубляются» и расширяют свою зону разгрузки медленно, а потенциал нарастает относительно быстро, то новые структурные элементы могут появляться на расстоянии меньше, чем l, от предыдущего элемента. Причем чем выше скорость нарастания потенциала, тем меньше будет это расстояние. Плотная упаковка элементов первой генерации может исключить возникновение элементов более высоких генераций.

Другое условие: пусть в пределах массива потенциальный рельеф имеет общий наклон от линии AD к линии BC. Линия AD — это гребень рельефа. Тогда при наращивании потенциала условие $E_y = P$ выполнится на линии AD. Проникать в массив в направлении BC линии не могут, там $E_y < P$. Поэтому на гребне перпендикулярно ему должны возникать коротенькие элементы, зона их разгрузки будет узенькой, и их здесь появится множество. Чем острее гребень, тем короче элементы и тем меньше ширина окружающих их зон разгрузки, тем соответственно большее их число расположится на гребне (рис. 59, а). Если наращивать значение потенциала, то граница области с условием $E_y = P$ начнет смещаться в сторону BC, граница «потянет» за собой вершины всех элементов (см. рис. 59, б). Острой конкуренции между ними при этом не возникнет, так как ни одна линия не может далеко «вырваться» за линию $E_y = P$ и опередить другие элементы в разгрузке потенциала. При очень сильном наращивании потенциала в наиболее широких полосах между элементами этого рисунка могут появиться элементы второй генерации (рис. 59, б).

Представим теперь, что в пределах рассматриваемого массива потенциальный рельеф имеет общий наклон к точке C. Несложно показать, что структуры, образующиеся в этом случае при наращивании потенциала, принципиально не будут отличаться от уже рассмотренных структур, возникающих при наклоне порогового рельефа к линии CD (см. рис. 58), но упаковка линий будет более плотной. В случае, если такая структура не захватит все рассматриваемое пространство, будет виден косой фронт, соответствующий условию $E_y = P$ (рис. 60).

Теперь при тех же условиях разгрузки рассмотрим закономерности формирования пространственных структур в пределах поля, ограниченного окружностью. Зададим, что потенциал во всех точках этого круга ориентирован вдоль его радиуса, т. е. элементы могут быть ориентированы только вдоль радиуса. В первом варианте допустим, что в пределах контура

величина потенциала везде одинакова и равномерно возрастает. Тогда условие $E_r = P$ возникнет по всему контуру. Примем, что структурные элементы развиваются моментально. Тогда первый элемент, возникнув в любом месте, рассечет круг пополам. Последующие же элементы, зарождаясь в случайных местах за пределами имеющихся зон разгрузки, будут развиваться лишь до тех пор, пока их вершина не дойдет до края какой-то зоны разгрузки. Образующаяся при этом структура показана на рис. 61, а. Если после этого продолжать наращивать значения потенциала, то эти элементы начнут достраиваться к центру круга, проникая своими вершинами в зоны разгрузки других элементов. В это же время на кромке длины окружности в центре наиболее широких промежутков будут зарождаться элементы второй генерации (рис. 61, б). Если задать, что в вершинах элементов происходит концентрация потенциала, то элементы проникнут к центру и без наращивания потенциала.

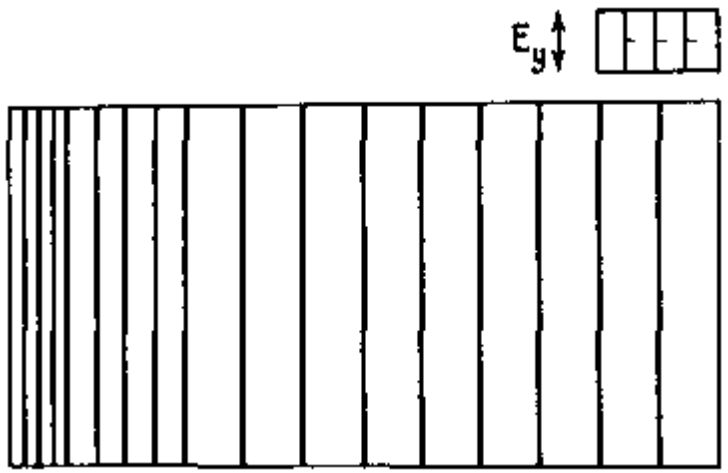


Рис. 58

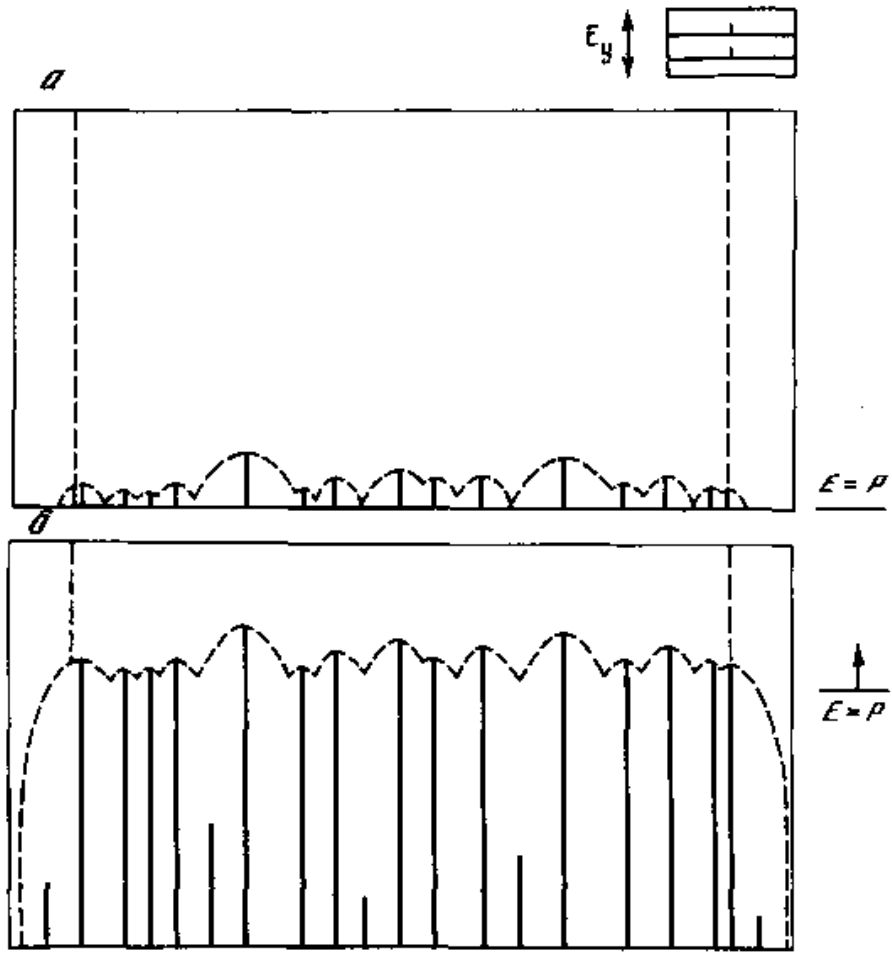


Рис. 59

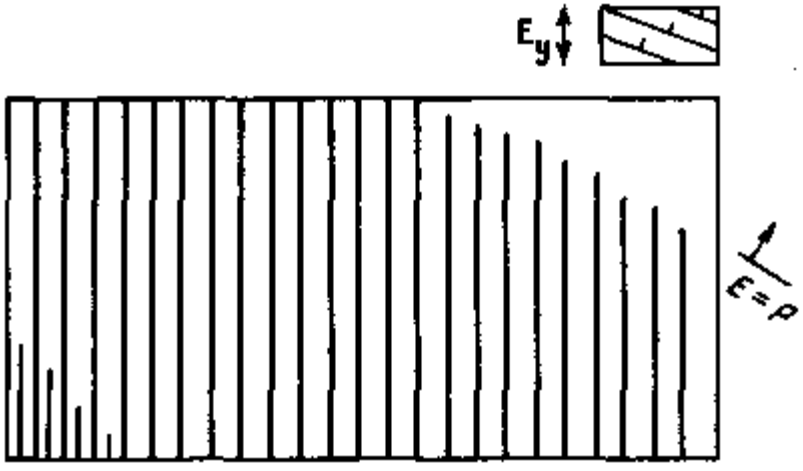


Рис. 60

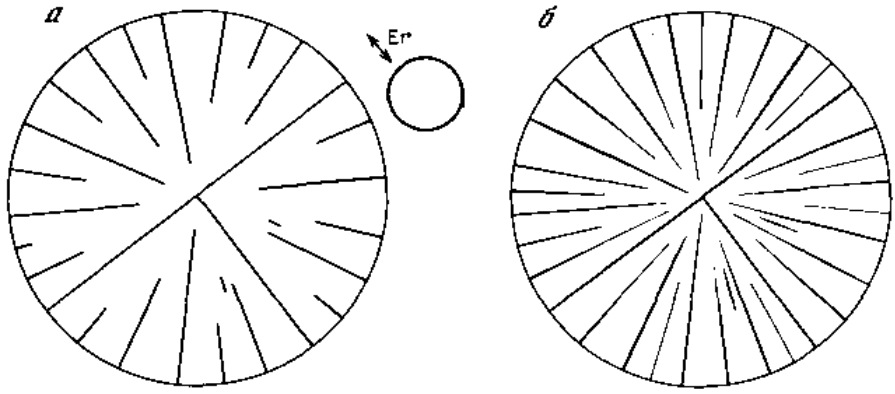


Рис. 61

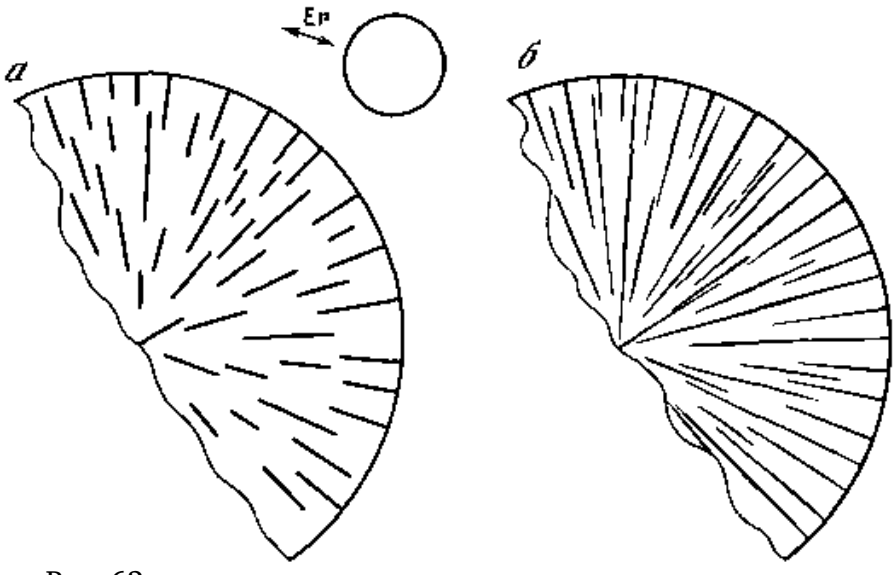


Рис. 62

Допустим, что структурные элементы развиваются медленно, тогда при достижении условия $E_r = P$ возникнет множество коротких штрихов, которые своими зонами разгрузки перекроют все пространство (рис. 62, а). Если продолжать наращивать потенциал или задать, что в вершинах элементов происходит его концентрация, то элементы начнут удлиняться, проникая в режиме конкуренции своими вершинами в зоны разгрузки других элементов (см. рис. 62, б).

Зададим новую геометрию потенциального рельефа. Пусть это будет пологий конус с вершиной, расположенной в центре рассматриваемого круга. В этой точке в первую очередь выполнится условие $E_r = P$. В подобной точечной ситуации для

описания реальных условий всегда необходимо учитывать микронеоднородность и то, что в той или иной степени концентрация потенциала у концов элементов будет происходить, и они из вершины могут проникать в область $E_r < P$. Из вершины может выйти три — пять лучей. Лишь в этом случае они будут развиваться за пределами зоны разгрузки других лучей (рис. 63). В точках, изображенных на врезках рис. 63, наращивание потенциала вызовет зарождение новых элементов. Дальнейшее наращивание потенциала в конечном итоге приведет к формированию структур, все элементы которых, кроме первых, являются элементами более высоких генераций. Закладывались они посередине между элементами предыдущей генерации. В итоге возникли высокоупорядоченные структуры. В случае несимметричного сочленения в вершине структура в пределах каждого из секторов будет высокоупорядоченной, но в целом несимметричной (см. рис. 63, а, б). Мы везде принимаем, что ширина зоны разгрузки конечна. Но можно задать, что по мере удлинения элемента ширина его зоны разгрузки постоянно увеличивается. В этом случае в последнем примере с потенциальным рельефом в виде конуса множество элементов не появится, даже линии первой генерации, секущие круг, могут разгрузить все пространство.

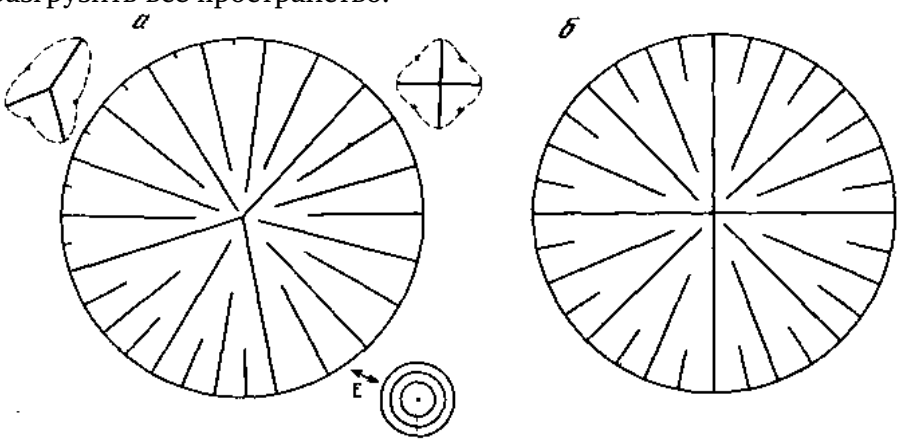


Рис. 63

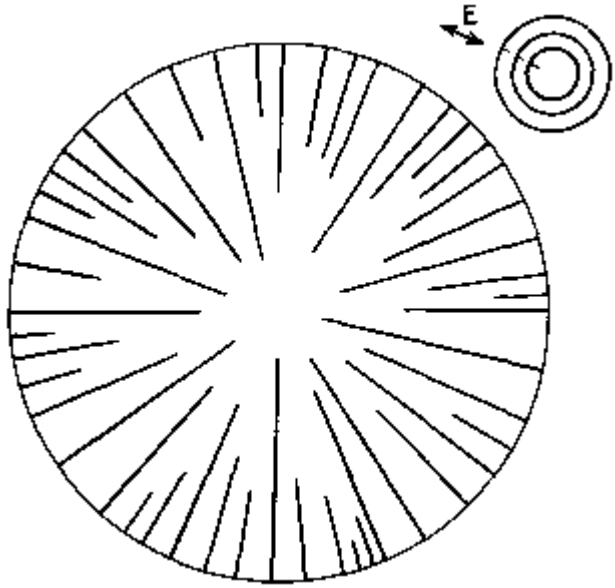


Рис. 64

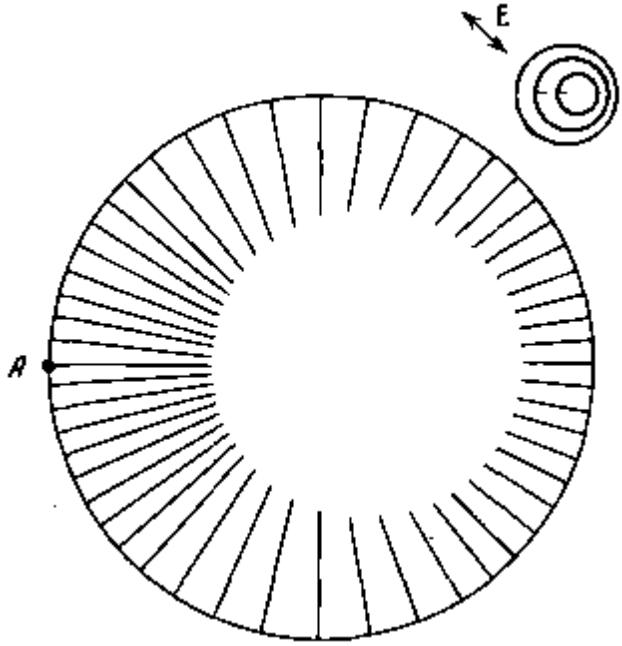


Рис. 65

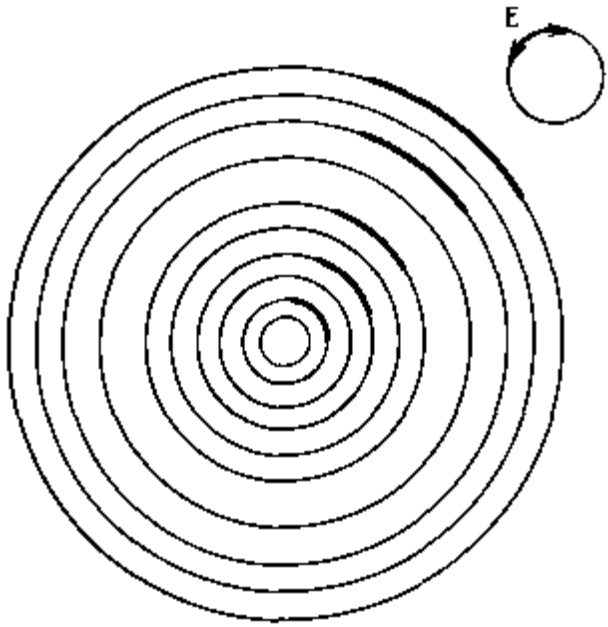


Рис. 66

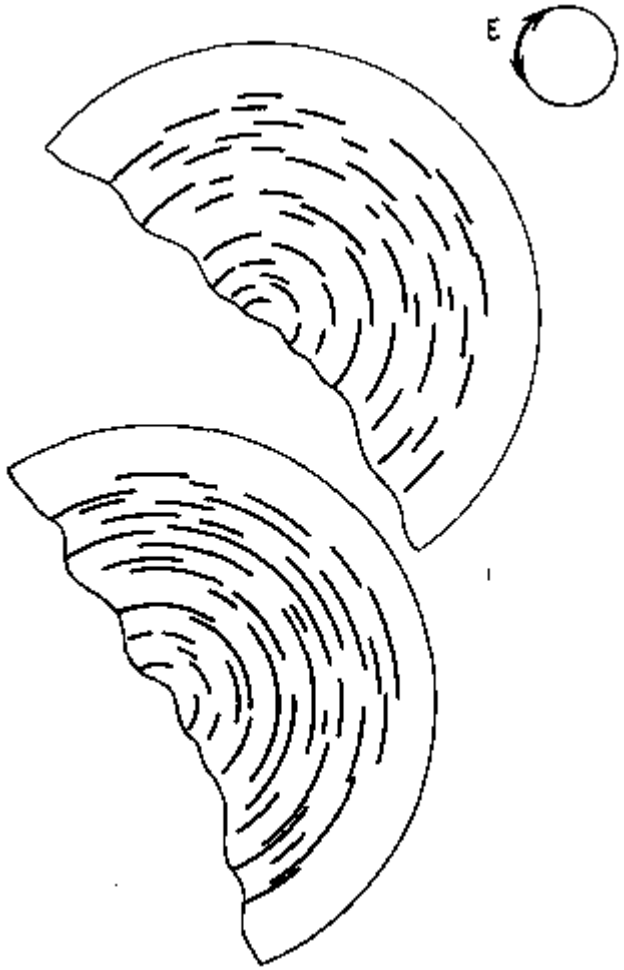


Рис. 67

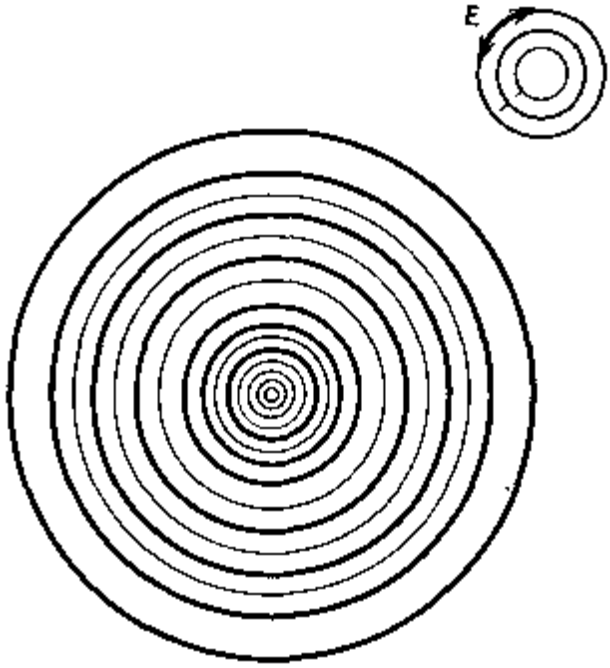


Рис. 68

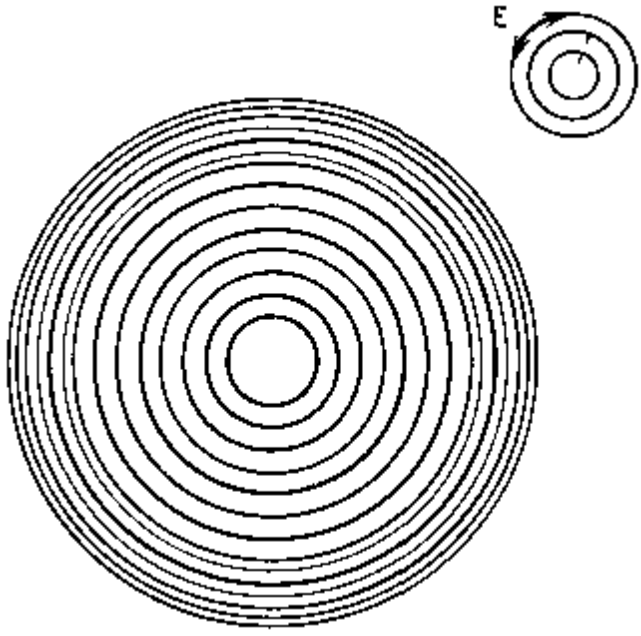


Рис. 69

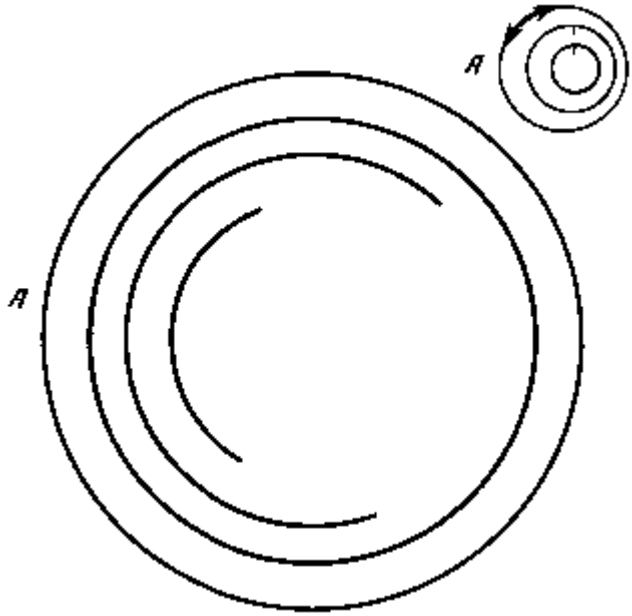


Рис. 70

Теперь представим, что потенциальный рельеф имеет форму перевернутого конуса. Условие $E_r = P$ в этом случае первоначально выполнится по всей длине окружности. Здесь в случайных местах и будут зарождаться элементы. Их количество и расстояние между ними будут определяться степенью концентрации потенциала в их вершинах, скоростью их развития и темпами нарастания потенциала. Но во всех случаях высокой упорядоченности в структуре не будет. При наращивании потенциала эти элементы в режиме конкуренции за сокращающееся пространство будут удлиняться к центру (рис. 64).

Изменим условия. Пусть этот перевернутый конус будет немного наклонен. Тогда условие $E_r = P$ первоначально выполнится лишь в одной точке А на периметре круга. Здесь образуется первый элемент. Со временем, по мере роста потенциала, у краев зоны разгрузки этого элемента на периметре круга возникнут два новых элемента. В свою очередь, и у края их зоны разгрузки появятся новые элементы и т. д. (рис. 65). Отметим, что при фиксированной скорости роста элементов и равномерном наращивании потенциала расстояние между элементами в рассматриваемом примере с конусом должно закономерно различаться. Минимальным оно будет возле первого и последнего элементов. После заложения всех элементов первой генерации дальнейшее наращивание потенциала приведет к их удлинению к центру круга и к заложению элементов новой

генерации.

А теперь изменим потенциальную функцию. Зададим, что во всех точках в пределах круга значима лишь составляющая, ориентированная перпендикулярно радиусу, т. е. элементы могут быть представлены только окружностями или их отрезками. Структуры, которые при этом будут возникать, изображены на рис. 66—70. Определяющие их условия соответствуют условиям, принятым для структур, изображенных на рис. 61—65 соответственно.

Прямоугольные решетки

В предыдущем разделе мы рассмотрели некоторые варианты формирования структур в условиях, когда потенциальная функция имела лишь одну составляющую, элемент не имел права выбора ориентации. Теперь перейдем к механизмам формирования более сложных сетчатых прямоугольных (тетрагональных) структур. Они появляются, когда линейный элемент может возникнуть как в направлении x, так и y. Рассмотрим закономерности формирования рисунка в пределах прямоугольного массива. Также зададим конечную ширину зоны разгрузки структурных элементов и примем, что пороговая функция — скаляр, а ее значения в пределах рассматриваемого пространства одинаковы и постоянны. Зададим, что в пределах рассматриваемого массива максимальные значения потенциала имеет составляющая, ориентированная в направлении y, а минимальные — в направлении x. Примем, что соотношение E_y/E_x в пределах всего поля одинаково. В таком потенциальном поле все возникающие структурные линии первой генерации будут ориентированы в направлении y. Дальнейшее же развитие структуры будет определяться особенностями разгрузки ими потенциала. Если элементы в равной степени разгружают потенциал и в направлении y, и в направлении x, то во всех случаях составляющая в направлении y будет максимальной, и элементы любой генерации будут ориентированы в этом направлении (см. предыдущий раздел). Если же элемент разгружает потенциал лишь в направлении своей ориентации, например в направлении y, а значения потенциала для направления x при этом не меняются, то значения потенциала в этом направлении могут оказаться выше, соответственно в зоне разгрузки элемента, ориентированного в направлении y, может возникнуть элемент, ориентированный в направлении x.

Зададим, что значения потенциальной функции в пределах рассматриваемого пространства ABCD везде одинаковы (рельеф горизонтальный). Примем E_y/E_x равным 1,5. Стороны рассматриваемого пространства представим структурными элементами: стороны AB и CD на расстоянии l от себя разгружают потенциал в направлении y, а стороны BC и CD на том же расстоянии — в направлении x. При наращивании потенциала в первую очередь выполнится условие $E_y = P$, выполнится оно по всему пространству. В случайных местах за пределами зон разгрузки сторон AB и CD будут возникать элементы, ориентированные в направлении y. При их моментальном росте

возникнет структура с расстоянием между элементами от l до $2l$ (рис. 71, а). В полосах между элементами происходит разгрузка потенциала в направлении y. При этом в наиболее узких полосах, шириной близкой к l, максимум потенциала уменьшится почти в 2 раза. Соответственно в большинстве полос составляющая потенциала в направлении x становится больше, чем в направлении y, но в наиболее широких полосах это еще не наблюдается. Поэтому при дальнейшем наращивании потенциала широкие полосы разобьются вдоль элементами второй генерации, и лишь затем повсеместно выполнится условие $E_x = P$. Тогда полосы в случайных местах начнут разбиваться поперечными элементами (см. рис. 71, б). Расстояние между ними при этом будет изменяться от l до $2l$. Эти элементы разгрузят потенциал в направлении x, в результате в большинстве ячеек составляющая величины потенциала в направлении y вновь окажется больше, чем в направлении x. Поэтому при наращивании его значений прямоугольники разобьются пополам элементами, направленными вдоль оси y. И лишь наиболее вытянутые вдоль оси y ячейки опять разобьются пополам в направлении x (см. рис. 71, в).

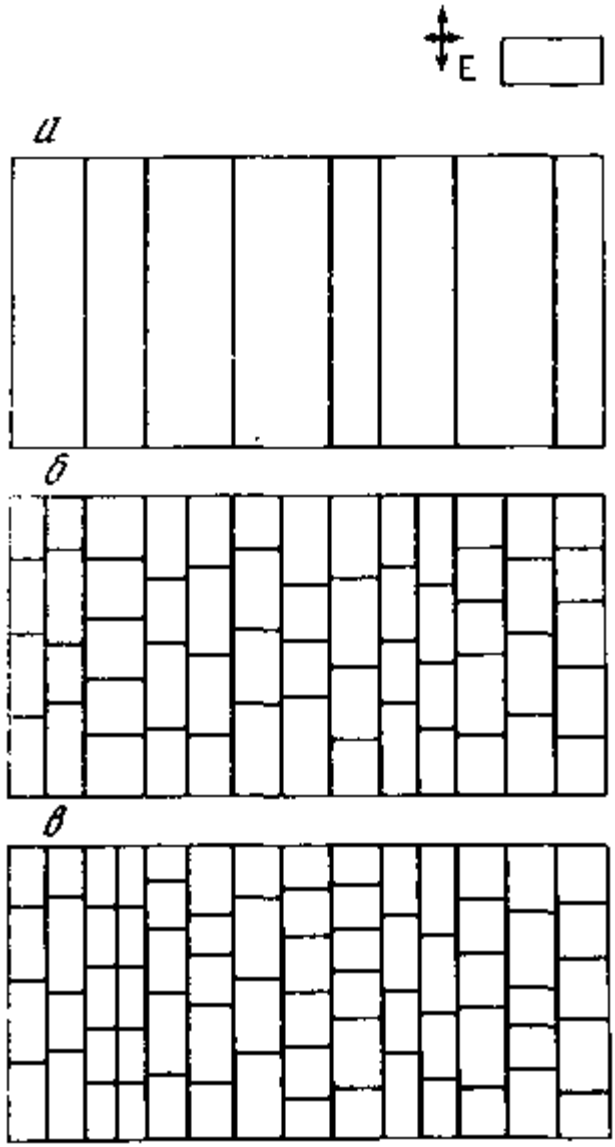


Рис. 71

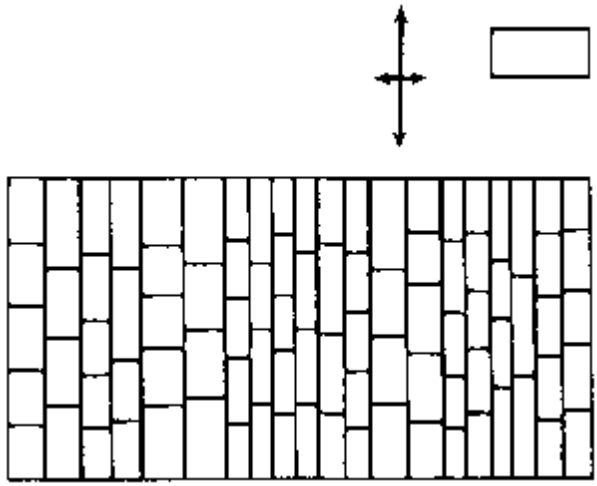


Рис. 72

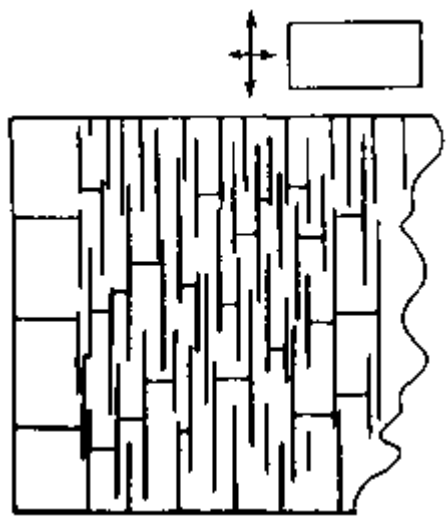


Рис. 73

Если задать $E_y/E_x = 3$, то первоначально возникнет структура, такая же, как на рис. 71, а, но при наращивании потенциала поперечные полосы начнут образовываться здесь только после того, как повсеместно образуются элементы второй генерации и в наиболее широких полосах появятся элементы третьей генерации (рис. 72).

Если принять, что элементы развиваются медленно, а в их вершинах значительной концентрации потенциала не происходит, то первоначально возникнет такая же структура, как изображенная на рис. 57, а. Последующие варианты ее развития при наращивании потенциала будут определяться соотношением E_y/E_x. Если оно небольшое, то возникнет структура, как на рис.

73. если же это соотношение больше, то к тому моменту, когда выполнится условие $E_y = P$, элементы первой генерации глубоко зайдут в зоны разгрузки друг друга.

Зададим другую форму потенциального рельефа. Пусть он полого наклонен в сторону CD, гребень его максимума располагается на линии разгрузки стороны AB. На этом гребне и возникнет первый элемент. Примем, что элементы развиваются моментально. Тогда при наращивании потенциала следующий элемент образуется на расстоянии l от первого. Если отношение E_y/E_x небольшое, то, еще до того как образуется третий элемент, полоса между этими двумя элементами разобьется поперечными, которые будут удалены один от другого на расстояние от l до $2l$. Дальнейшее наращивание значений потенциальной функции приведет к образованию структуры, изображенной на рис. 74, а. Отметим, что в ее левой части могут появиться элементы высших генераций. Если же отношение E_y/E_x большое, то полосы между элементами, ориентированными в направлении y, будут вначале разбиваться элементами более высоких генераций этого же направления, и лишь затем появятся поперечные элементы (рис. 74, б). У этих структур в направлении смещения «границы» элементы строго упорядочены. На рис. 71—74 видно, что по степени вытянутости прямоугольных ячеек можно оценить величину отношения E_y/E_x.

Изменим наклон потенциального рельефа в сторону BC, тогда максимум потенциала расположится на границе зоны разгрузки линии AD. При выполнении условия $E_y = P$ здесь в случайных местах будут возникать элементы, ориентированные в направлении y. В зависимости от степени концентрации потенциала в вершинах элементов, скорости их развития и наклона потенциального рельефа может возникнуть структура, близкая структурам, изображенным на рис. 59. Как только потенциал возрастет настолько, что выполнится условие $E_y = P$, а произойдет это на границе разгрузки линии AD, то по этому гребню продольные полосы будут разбиты поперечными. Дальнейшее наращивание потенциала вызовет заложение на расстояние l от этой линии новой серии поперечных. В итоге образуется структура, подобная изображенной на рис. 75. В направлении смещающейся границы расстояние между элементами здесь строго выдержано.

Зададим наклон потенциальной поверхности к точке C. Ее максимум (E_y) при этом будет расположен на стороне AD на расстоянии l от стороны AB (на границе разгрузки стороны AB). Здесь при наращивании потенциала произойдет заложение элемента, ориентированного в направлении y. Следующий

элемент возникнет на линии AD на краю зоны разгрузки первого и т. д. Если элемент не может проникнуть глубоко в зону E < P, то его зона разгрузки будет узкой и расстояние между элементами будет меньше l и будет зависеть от угла наклона фронта структурообразования. В какой-то момент выполнится условие $E_y = P$. Произойдет это на линии AB на границе разгрузки стороны AD. Здесь образуется первый элемент, ориентированный вдоль оси x. Следующие поперечные элементы образуются рядом также на линии AB и «в другой стороне» на продолжении первого (рис. 76). В итоговой структуре из-за того, что граница смещается относительно обеих осей координат, элементы строго упорядочены и в направлении y, и x. Вблизи точки A в этой структуре могут появиться элементы высших генераций.

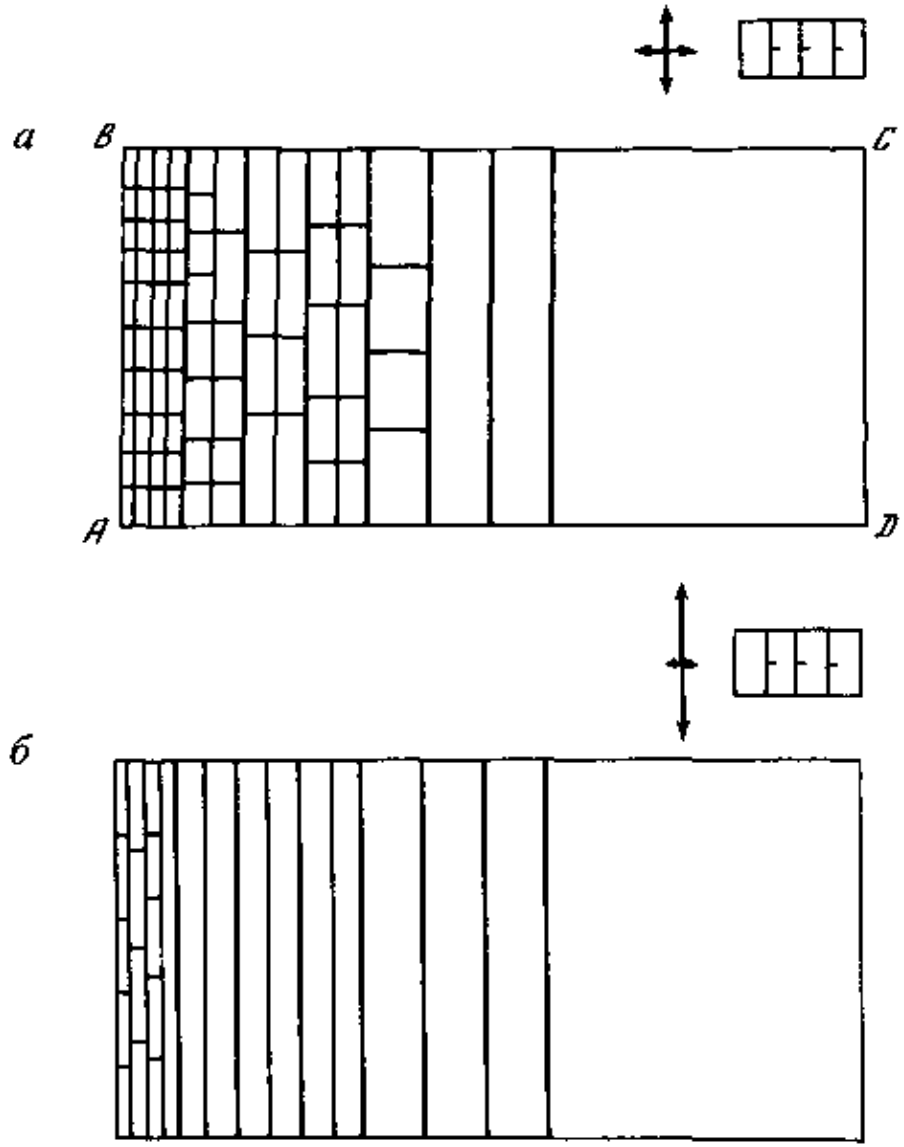


Рис. 74

Сохраним условие наклона потенциального рельефа от точки А к точке С, но развернем массив относительно осей координат. В этом случае образующиеся элементы не будут параллельны сторонам прямоугольного контура. Структура, возникшая в этих условиях при наращивании потенциала, показана на рис. 77.

Теперь охарактеризуем некоторые тетрагональные сетчатые структуры, возникающие в пределах пространства, ограниченного кругом. Примем, что величина потенциала здесь имеет составляющую в направлении, совпадающем с радиусом круга, и

нормальном ему направлении, но в одном из направлений она преобладает. Соответственно образующиеся структуры будут производными от структур, изображенных на рис. 61 и 66, 62 и 67, 63 и 68, 64 и 69, 65 и 70. У возникающих структур магистральными будут те элементы, направление которых соответствует направлению, в котором задан максимум величины потенциала. Некоторые из возможных структур, возникающих при этих условиях, изображены на рис. 78—80; на них показаны в основном лишь элементы первой генерации.

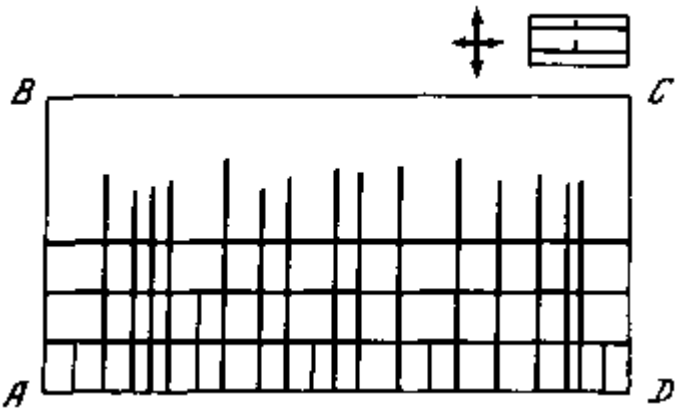


Рис. 75

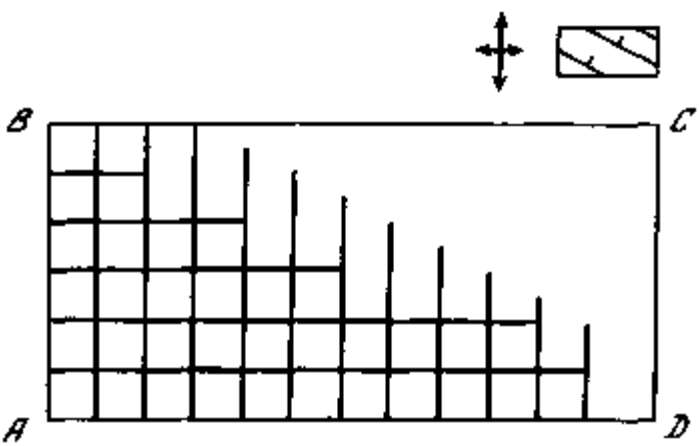


Рис. 76

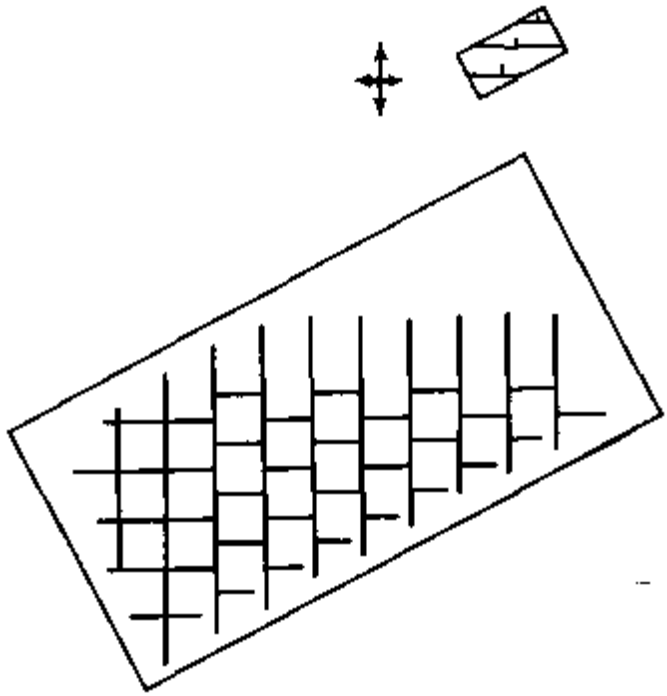


Рис. 77

При сложном рельефе потенциальной функции ее можно графически представить следующим образом: расставить в пространстве множество точек и значения потенциальной функции в каждой точке охарактеризовать индикатрисой. Пример потенциальной функции, заданной таким образом, приведен на рис. 81, там же показана последовательность развития структуры, которая возникнет в этом потенциальном поле при наращивании потенциала.

В этом разделе мы рассмотрели ситуации, когда потенциал был ориентирован только в двух направлениях: x и y (индикатриса-крест). Но тетрагональные решетки могут возникнуть и при других индикатрисах. Например, в виде ромба, эллипса. Но в ситуации с эллипсом возможен вариант, когда в какой-то точке, после того как в главном направлении потенциал будет частично разгружен проходящим рядом элементом, индикатриса в этой точке примет форму окружности. Условия станут изотропными, и элемент, зародившийся в этой точке, может быть ориентирован в любом направлении. Такая ситуация возможна в центрах прямоугольных ячеек. Если индикатриса имеет форму восьмерки, то при появлении элемента в его зоне разгрузки она примет «X»-образную форму. В этом случае параллельная система элементов первой генерации будет разбита

поперечными под острыми углами (рис. 82).

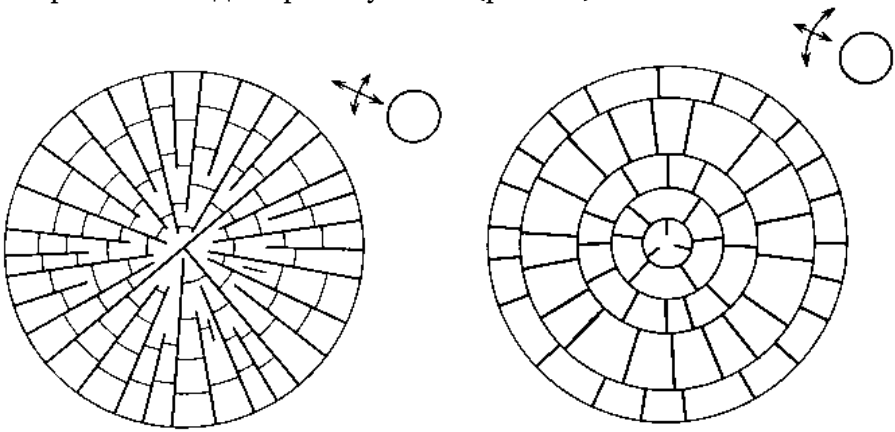


Рис. 78

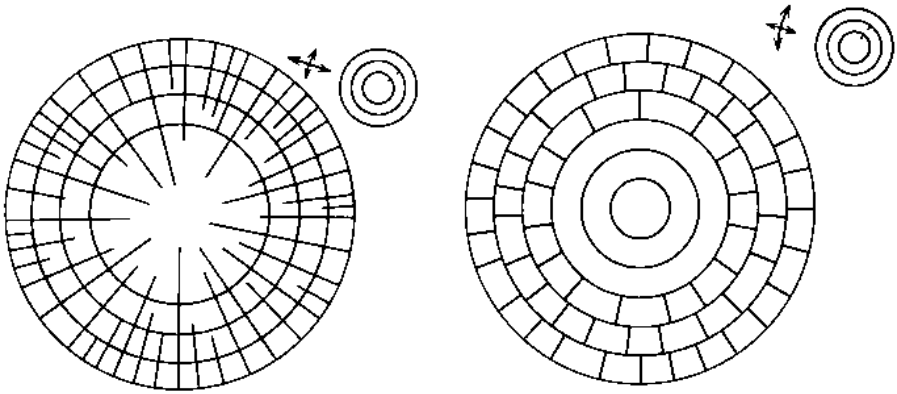


Рис. 79

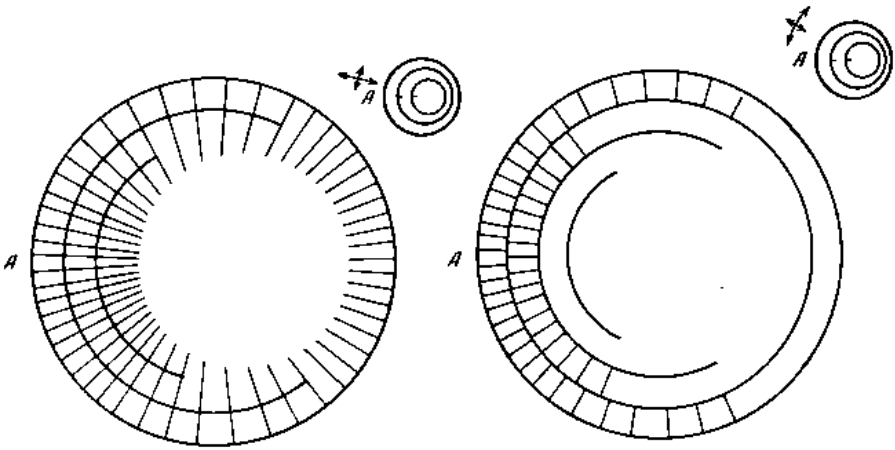


Рис. 80

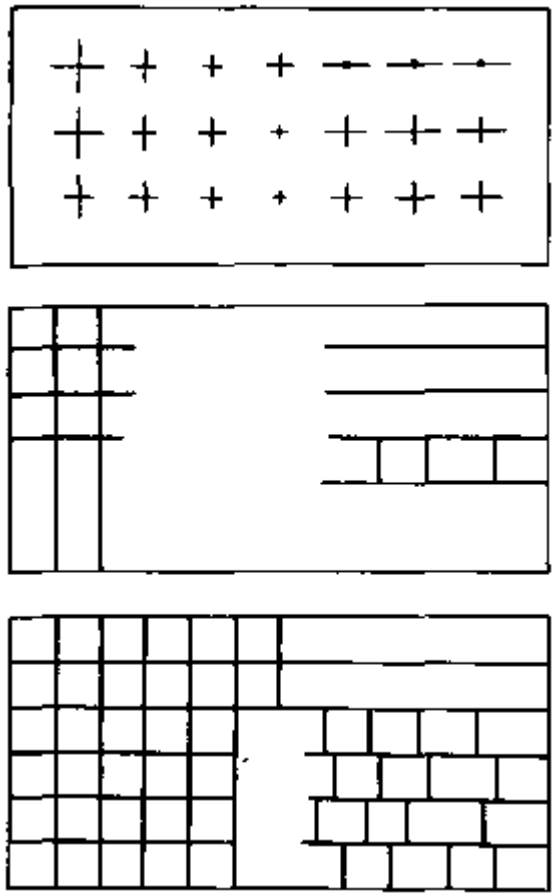


Рис. 81

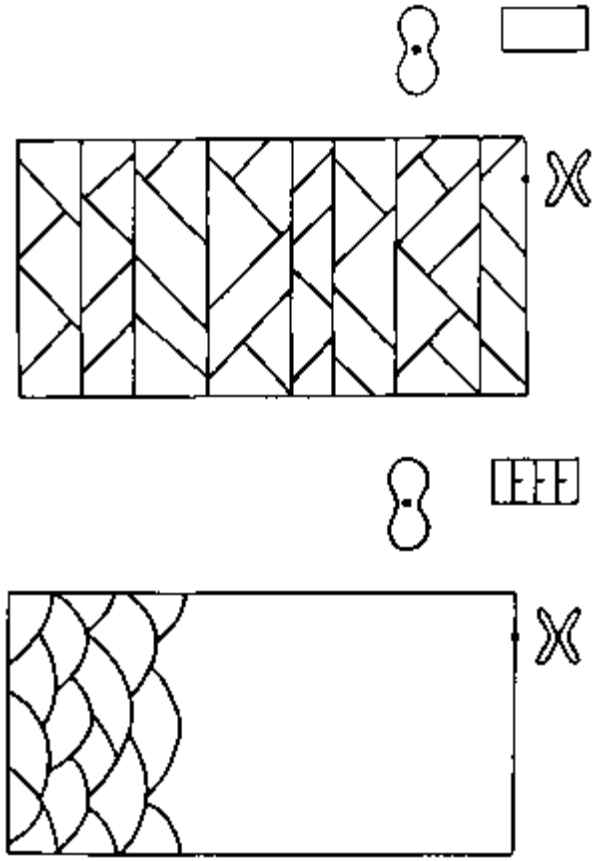


Рис. 82

Мы рассмотрели варианты с простейшими потенциальными рельефами — плоский и наклонный рельеф, выпуклый и вогнутый конусы. Если в реальном рельефе неоднородности очень крупные, то его можно расчленить на эти элементарные участки и общий рисунок структуры представить в виде суммы рассмотренных элементарных структур.

Если порогово-потенциальные рельефы микробугристы, то линейные элементы при своем развитии, стремясь пересечь вершины бугорков, будут отклоняться от прямолинейного движения, станут извилистыми. Их параллельность не будет выдерживаться. На рис. 83 показано развитие структуры при плоском потенциальном рельефе в анизотропном, однородном (а) и микронеоднородном поле (б).

Специфично развитие структур при мезонеоднородном потенциальном рельефе, когда характерный размер неоднородностей сравним с шириной зоны разгрузки линейных элементов. В этом случае при отсутствии резкой анизотропии

неоднородности потенциального рельефа будут задавать рисунок структуры. Например, если потенциальный рельеф состоит из множества равновысотных бугров, то на первом этапе в их вершинах сформируются лучевые элементы, которые при дальнейшем наращивании потенциала в условиях взаимопритяжения вершин элементов сформируют полигональную структуру, изображенную на рис. 84. Если потенциальный рельеф состоит из множества беспорядочно размещенных углублений, разделенных гребнями, то элементы будут возникать на этих гребнях. В итоге появится неупорядоченная полигональная ячеистая сеть (рис. 85).

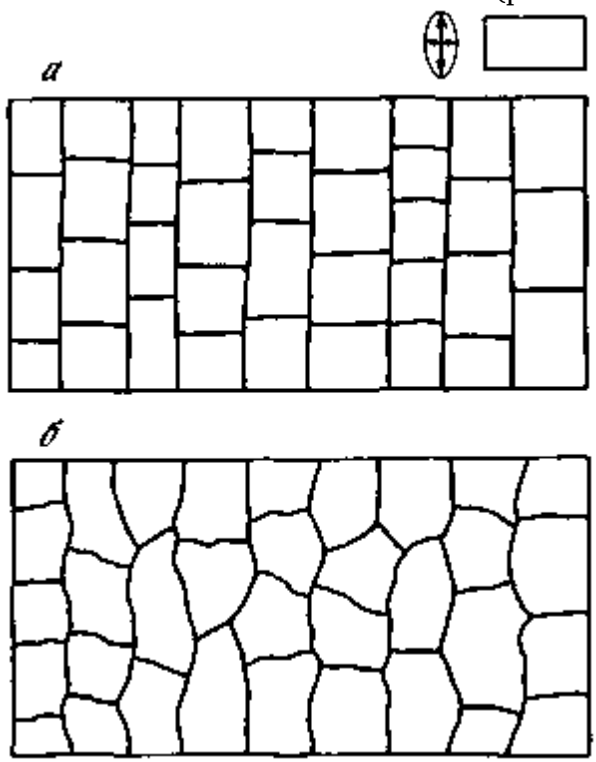


Рис. 83

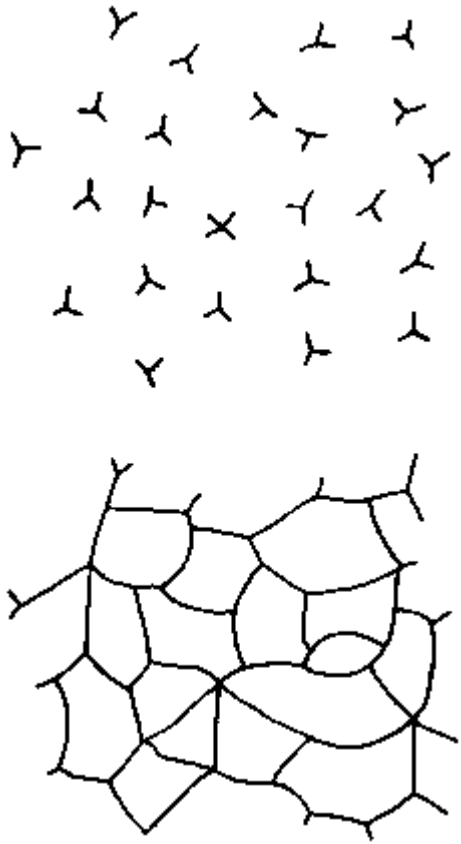


Рис. 84

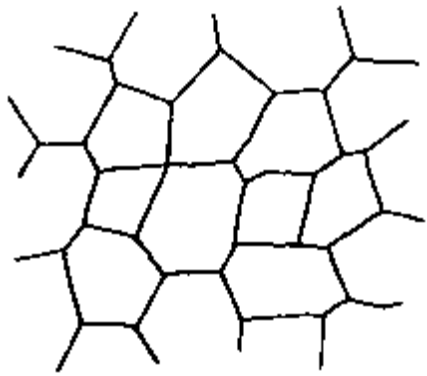


Рис. 85

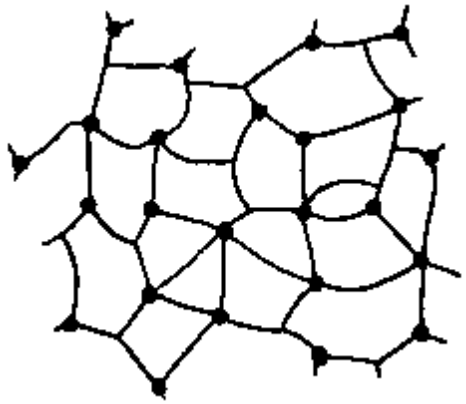


Рис. 86

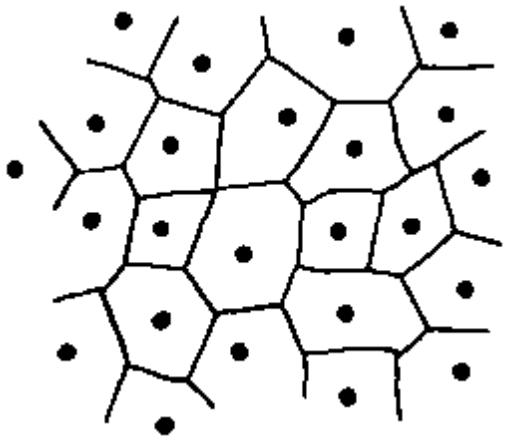


Рис. 87

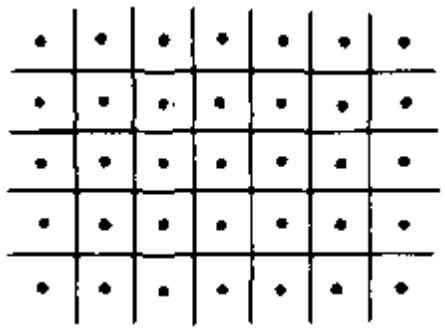


Рис. 88

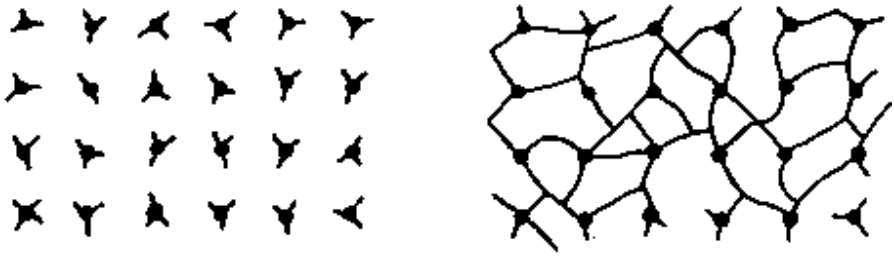


Рис. 89

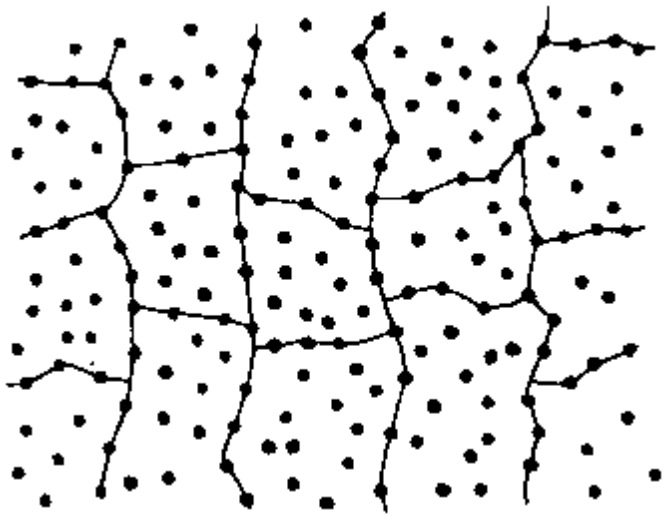


Рис. 90

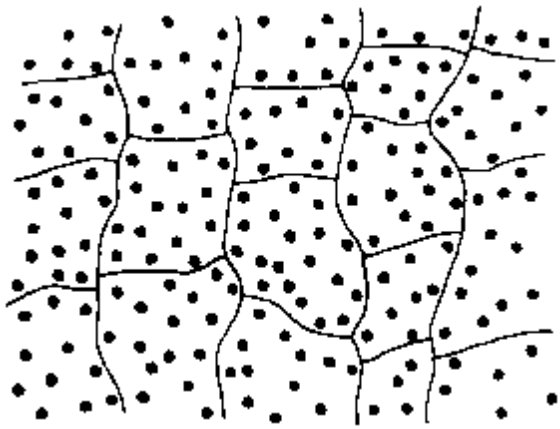


Рис. 91

Возможны структуры, состоящие одновременно из линейных и точечных элементов. Предположим, что первоначально возникает рисунок из точек. Если они влияют на пороговопотенциальные функции линейных элементов (разгружают или

усиливают), то в порогово-потенциальном рельефе линейных элементов возникнут ямы или бугры и развитие линейных элементов будет происходить по тем же схемам, которые мы только что рассматривали (рис. 86, 87). Если точечные элементы расположены взаимоупорядоченно, то и линейные элементы будут взаимоупорядоченны (рис. 88). Но не всегда. Если точки воздымают центральносимметричные конусы потенциального рельефа линий, то они будут неупорядоченны (рис. 89). Если ширина зоны разгрузки точечными элементами потенциальной функции линейных элементов много больше, чем ширина их зоны разгрузки, то потенциальный рельеф можно рассматривать как множество больших элементарных конусов; если много меньше, то, по сути, точечные элементы создают микрошероховатость и линейные элементы будут извилисто развиваться от точки к точке (если они усиливают потенциал) (рис. 90) или стремиться обойти эти точки (если они разгружают потенциал линий) (рис. 91).

Куда пойти в изотропном поле?

Зададим, что во всех точках в пределах прямоугольного контура для всех направлений величина потенциальной функции одинакова. Примем, что линейные элементы в полосе шириной *2l* разгружают потенциал в равной степени и в направлении параллельном элементу и в перпендикулярном, т. е. мы приняли, что в любой точке потенциал всегда одинаков во всех направлениях, он скаляр. На линии элемента потенциал разгружен полностью, а при удалении от него степень разгрузки линейно убывает. Предположим, что стороны прямоугольного контура являются элементами, т. е. края контура на ширину l разгружены. Как и раньше, примем, что пороговая функция — скаляр и ее рельеф горизонтален. Для первых примеров примем, что концентрация потенциала в вершине элемента отсутствует.

При всех этих условиях при наращивании потенциала условие $E = P$ выполнится в пределах всего контура кроме граничных зон разгрузки. Соответственно в случайных местах и в случайных направлениях будут возникать структурные элементы, которые перекроют своими зонами разгрузки все пространство. Условия везде однородные, поэтому элементы будут удлиняться, сохраняя прямолинейность (рис. 92, а). При дальнейшем наращивании потенциала элементы будут удлиняться, проникая в зоны разгрузки соседних элементов, а в наиболее широких промежутках будут появляться элементы второй генерации (см. рис. 92, б).

Элементы при своем удлинении разворачиваются в направлении максимальных значений потенциала. Они как бы стремятся его разгрузить в максимальной степени и движутся туда, где он выше. Поэтому элемент, зайдя в зону разгрузки другого, будет стремиться развернуться и выйти из нее в зону, где потенциал не разгружен. Здесь нам необходимо задать возможный радиус разворота элемента. Он может быть очень большим, и тогда из зоны разгрузки смогут выйти лишь элементы, подходящие друг к другу под острым углом (рис. 93, а). При малом радиусе разворота элементы будут быстро выходить из зоны разгрузки (см. рис. 93, б). Отметим интересный момент: если элемент под углом заходит в полосу между двух других субпараллельных элементов, то, выйдя из зоны разгрузки одного, он попадает в зону разгрузки другого, из которой также стремится выйти. В этом случае возникнет элемент в виде извилистой линии (рис. 94). Примем, что в нашем примере минимальный радиус разворота порядка l. С учетом этих условий

структура, изображенная на рис. 92, а при наращивании потенциала трансформируется в структуру, подобную изображенной на рис. 92, б.

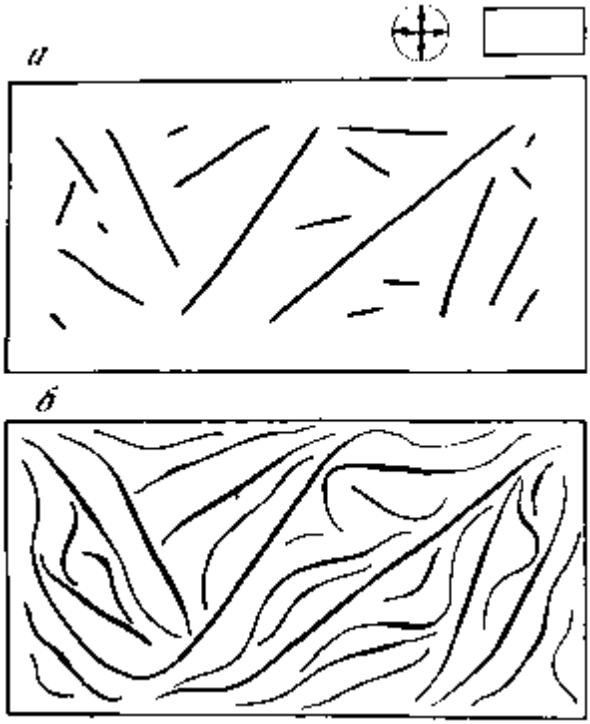


Рис. 92

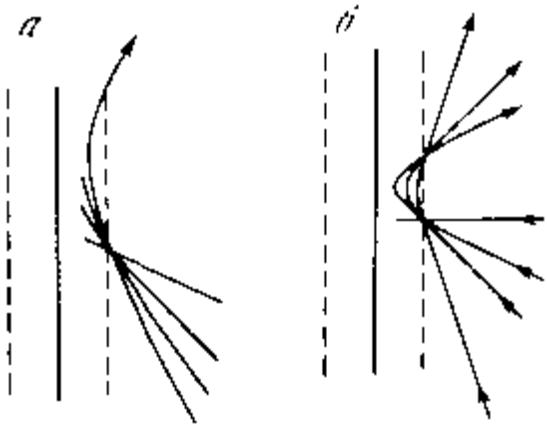


Рис. 93

Рис. 94

Рассмотрим еще одно условие, связанное с развитием структур, элементы которых в своих вершинах увеличивают («концентрируют») значение потенциала. Оговорим характерную для этого случая особенность встречи элементов. Элемент разворачивается в сторону наибольших значений, поэтому, встретив на своем пути вершину другого элемента, двигающуюся «встречным курсом», он начнет к ней разворачиваться. Соответственно и другая вершина будет стремиться к этой. В итоге два элемента сольются в одну линию (рис. 95).

Теперь зададим, что потенциальный рельеф имеет наклон в сторону кромки CD. В этом случае в рельефе на краю зоны разгрузки стороны AB будет равновысотный гребень, по которому и пойдет первый элемент, после этого на расстоянии l от этого элемента в потенциальном рельефе образуется новый гребень, по которому пойдет следующий элемент. Как видим, образуется параллельно-полосчатая структура, не отличающаяся от структур, возникающих при схожих условиях в анизотропном потенциальном поле. Однако сходство возможно лишь при прямолинейной границе. Если же у рассматриваемого массива задать другие очертания границы, то возникнут структуры, «заданные» ею (рис. 96). На рис. 97 видна ситуация, когда со временем вершины элементов разворачивались перпендикулярно первоначальному гребню потенциального рельефа. При этом вершины элементов должны стремиться развернуться в сторону больших значений потенциала — развернуться назад. Разворот при этом равновероятен и влево, и вправо. При развороте вершина элемента может встретиться с вершиной соседнего элемента или, если он разворачивается в ту же сторону, двигаться по краю его зоны разгрузки.

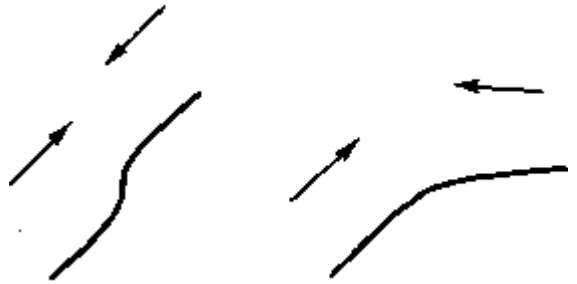


Рис. 95

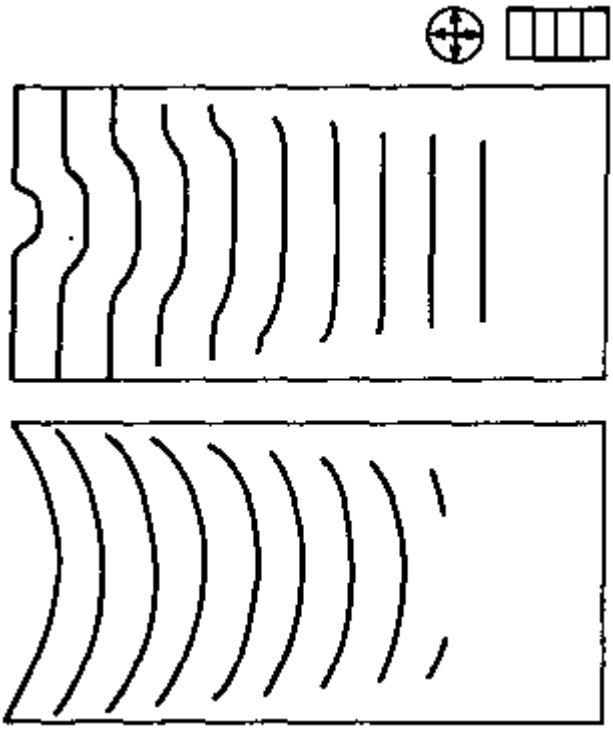


Рис. 96

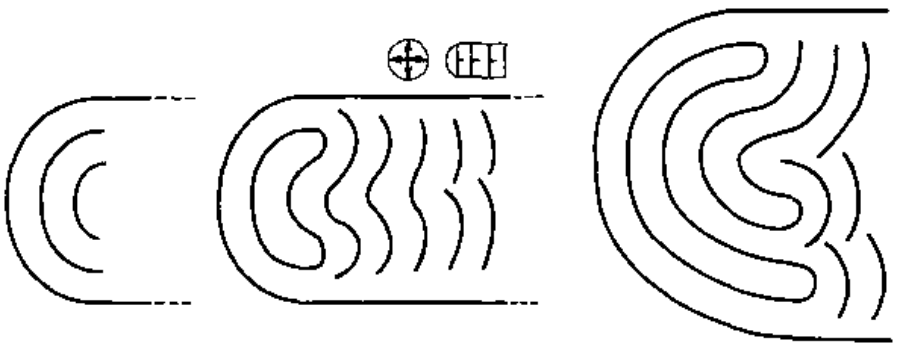


Рис. 97

Сложные структуры могут возникать и при прямолинейной границе. На прямолинейном гребне потенциального рельефа направление первоначального короткого элемента из-за локальных неоднородностей может немного отклониться от направления гребня (рис. 98, а). Тогда концы этой линии зайдут в области, где значения потенциала меньше, чем на гребне, и будут стремиться развернуться в его сторону (в зону с большими значениями потенциала). Развернувшись, они «по инерции» пересекут гребень и вновь, уже с другой стороны, войдут в область с меньшими значениями потенциала. В итоге образуется волнистая линия (рис. 98, б). После этого в потенциальном рельефе появится новый извилистый гребень. У этого гребня преобладающие вершины будут расположены на участках, наиболее близких к первоначальному гребню. Здесь произойдет заложение нового элемента (рис. 98, б), который должен удлиняться, повторяя очертания извилистого гребня. Но возможны условия, при которых вершина элемента «не впишется» в изгибы гребня и будет отклоняться от его оси. В итоге извилистость элемента при этом будет больше, чем извилистость гребня (рис. 98, в). В свою очередь, следующий элемент станет еще более извилистым. Нарастание извилистости может лимитироваться заданным предельным радиусом кривизны, тогда геометрия структуры стабилизируется. В противном случае произойдет отрыв элемента от границы зоны разгрузки предыдущего или смыкание зон разгрузки (рис. 98, г).

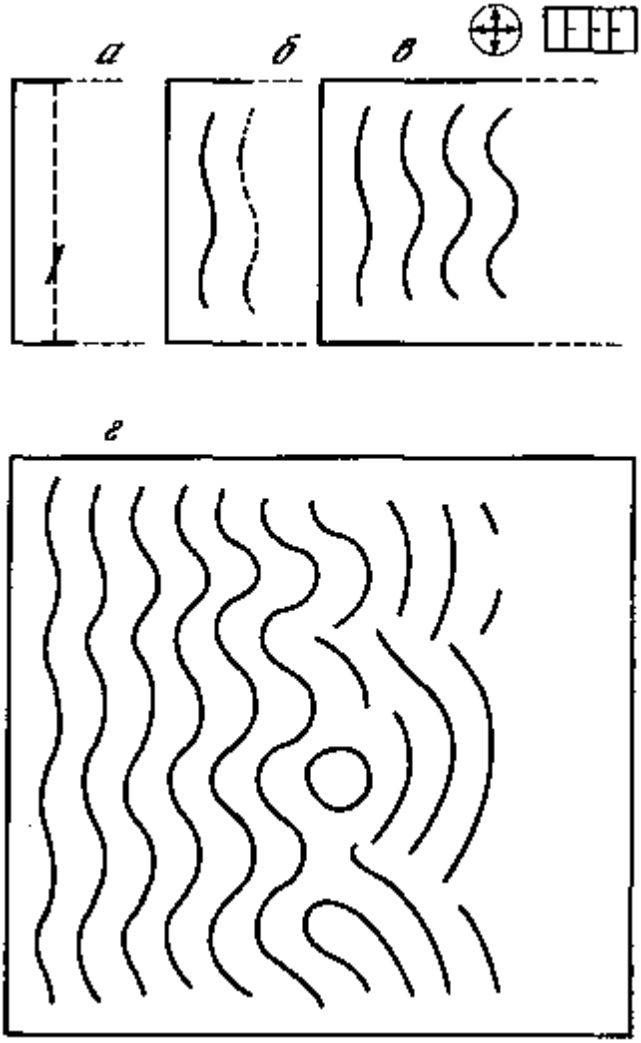


Рис. 98

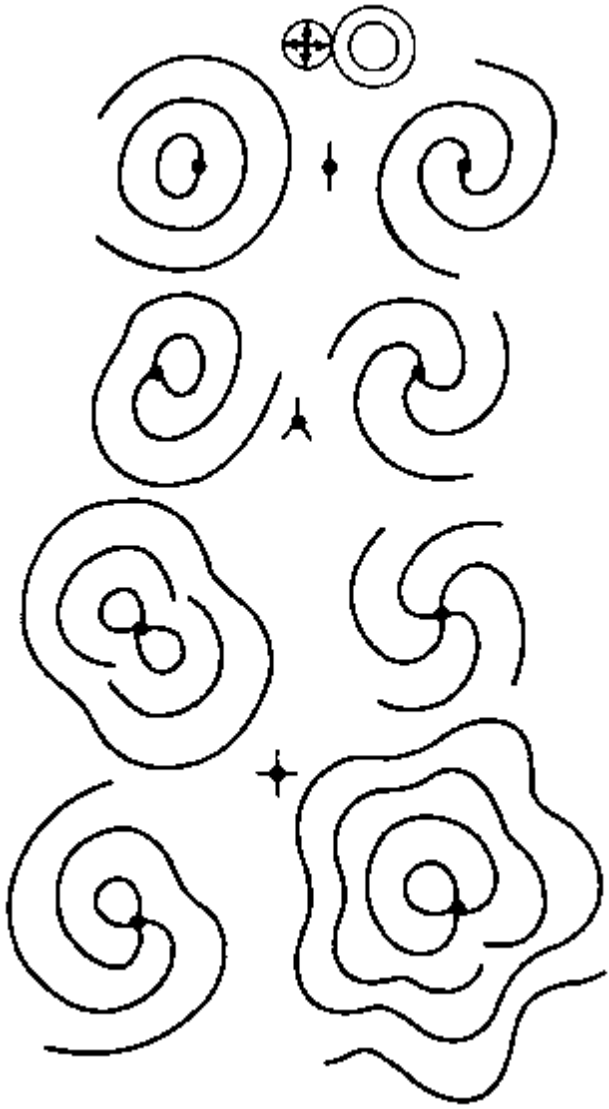


Рис. 99

Теперь зададим, что рельеф потенциальной поверхности представлен конусом. Условие $E = P$ выполнится в его вершине. В зависимости от локальных неоднородностей здесь может возникнуть элемент с двумя или более расходящимися от центра лучами. Каждый из этих лучей будет стремиться развернуться в зону с большими значениями потенциала — назад к вершине конуса. При этом разворот влево или вправо равновероятен. В зависимости от того, как при наращивании значений потенциала взаиморазвернулись элементы, могут возникнуть разные структуры (рис. 99). По мере развития этих структур может проявиться эффект неустойчивого движения элементов по гребню

потенциального рельефа — элементы станут извилистыми (см. последний фрагмент рис. 99).

Если потенциальный рельеф представлен перевернутым конусом с основанием, являющимся элементом, который разгружает вокруг себя потенциал, то новый и последующие элементы также будут кольцами, вложенными одно в другое — рисунок параллельных колец. Если же проявится эффект неустойчивости, то, по мере заполнения конуса рисунком, от элемента к элементу будут накапливаться неровности, и к центру рисунка параллельность элементов разрушится (рис. 100). В рассмотренных примерах элементы возле себя полностью разгружают потенциал, поэтому они не могут подходить друг к другу и зарождаться вблизи с другим. Но если на гребне рельефа перевернутого конуса в последнем примере сделать небольшую насечку (нарисовать первый элемент в виде небольшого крючка), то мы при последующем наращивании потенциала получим не систему колец, а спираль (см. рис. 100).

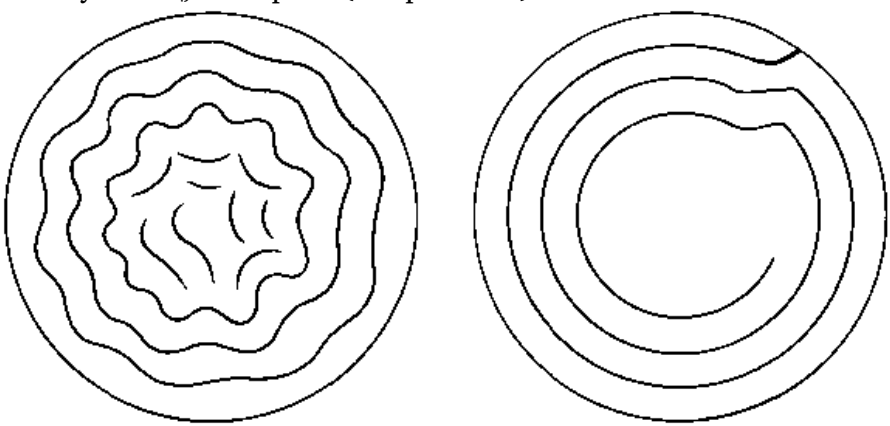


Рис. 100

И вновь немного изменим условия. Пусть потенциальная функция также изотропна — потенциал во всех направлениях одинаков, но при появлении элемента в зоне его разгрузки появляется анизотропность. Элемент разгружает потенциал в параллельном себе направлении и не разгружает в перпендикулярном, т. е. вблизи элемента возможен перпендикулярный ему элемент и невозможен параллельный. В этом случае, если один элемент входит в зону разгрузки другого, возможны два пути — выйти из зоны разгрузки (вернуться в область с высокими значениями потенциала) или развернуться в направлении, перпендикулярном другому элементу. В этом направлении потенциал здесь также не разгружен. Если элемент подходит к другому под очень острым углом, то он скорее выйдет

из зоны разгрузки, в противном случае — развернется к этому элементу и подойдет к нему под углом, близким к прямому (рис. 101). Если, удлиняясь, элемент зайдет в область, где перекрываются зоны разгрузки двух других элементов (рис. 102), то дальнейшее его продвижение в этом направлении станет невозможным, так как составляющая потенциала в этом направлении здесь разгружена. Но в направлении, перпендикулярном этому направлению, потенциал не разгружен, поэтому вершина элемента, развернувшись, подойдет к одному из двух элементов (см. рис. 102). С учетом этой особенности при принятых условиях возникнет структура, подобная изображенной на рис. 103. Отметим, что каркас этой структуры был задан таким же, как на рис. 92.

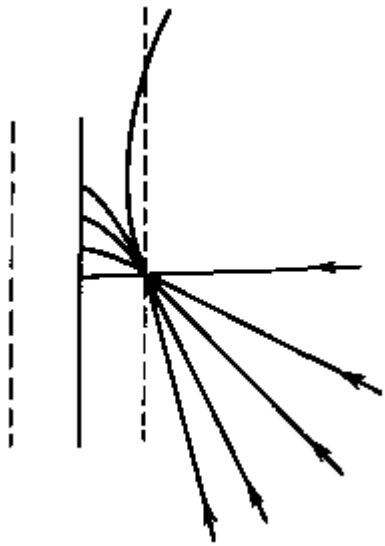


Рис. 101

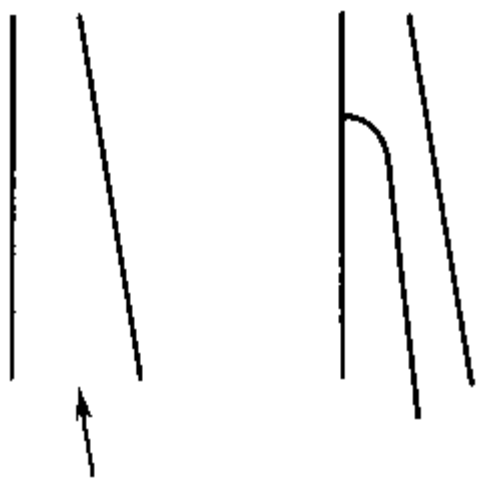


Рис. 102

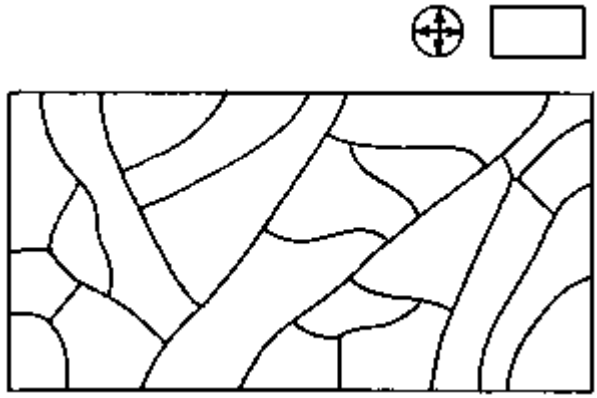


Рис. 103

Теперь зададим наклонную поверхность потенциального рельефа. Тогда на линии АВ расположится гребень его максимума. Но потенциал здесь будет иметь только одну составляющую в направлении линии АВ. Составляющая перпендикулярная этому направлению на линии АВ краем массива будет полностью разгружена, т. е. у края массива в полосе шириной l потенциальное поле анизотропно. При достижении на линии АВ условия $E = P$ здесь будут зарождаться структурные элементы (рис. 104, а). Проникая в глубь массива, они достигнут границы зоны разгрузки элемента АВ. Здесь поле потенциальной функции становится изотропным. Пересекая «по инерции» эту линию, элемент входит в зону с меньшими значениями потенциала и стремится развернуться в зону с большими значениями — назад к линии АВ (рис. 104, б). При этом вершины элементов будут или встречаться, или заходить в зону разгрузки других элементов и подходить к элементам под прямым углом (рис. 104, в). В результате сформируются тройные сочленения. В узлах тройного сочленения элементов зоны разгрузки накладываются, потенциал здесь разгружен по всем направлениям, поэтому при росте значений потенциала новые элементы будут закладываться на выпуклых участках края структуры, перпендикулярно имеющимся элементам, потенциал в этом направлении здесь ими не разгружен (рис. 104, г). Дальнейшее развитие структуры подобно первому этапу: элементы выйдут из зоны разгрузки и начнут разворачиваться обратно и т. д. (рис. 104, д). В этой структуре размер полигонов в направлении смещающейся границы будет выдержанным.

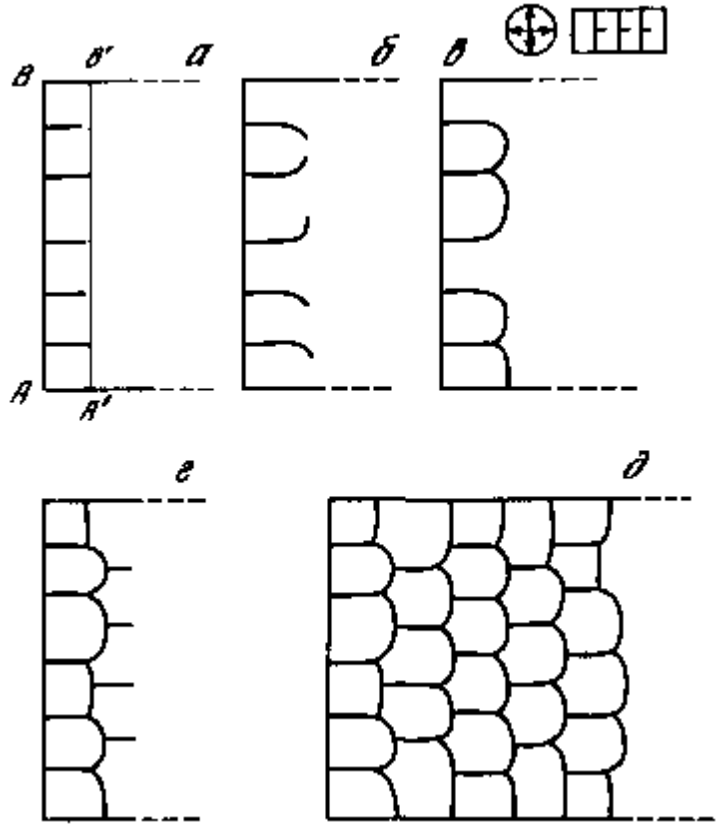


Рис. 104

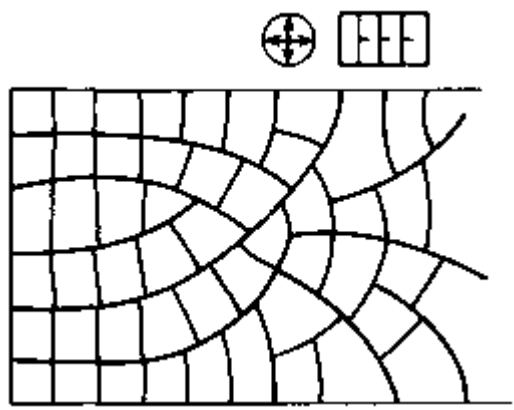


Рис. 105

В рассматриваемой схеме предполагалось, что наклон потенциальной поверхности очень крутой. Быстрый разворот элементов возможен лишь при определенных условиях: чем меньше минимальный радиус разворота, чем меньше их «инерционность» и чем больше наклон потенциальной

поверхности, тем быстрее они развернутся. В противном случае будут формироваться структуры, подобные изображенной на рис. 105.

Если потенциальный рельеф задать в виде конуса, то в случае заложения в его вершине тройного сочленения элементов при возможности их быстрого разворота сформируется упорядоченная структура, состоящая из шестиугольников (рис. 106).

Во всех предыдущих схемах и разделах в случае, если один элемент подходил к другому, предполагалось, что они не пересекались. Теперь же зададим, что элементы могут пересекаться. Особенности, накладываемые этим условием, во многих случаях не требуют особого пояснения. Поэтому все рассмотренные выше схемы для различных параметров потенциального поля, скорости развития элементов и т. д. рассматривать не будем. Ограничимся лишь некоторыми примерами. Так, в однородном анизотропном поле в случае моментального образования элементов при этом условии возникнут структуры, изображенные на рис. 107, 108.

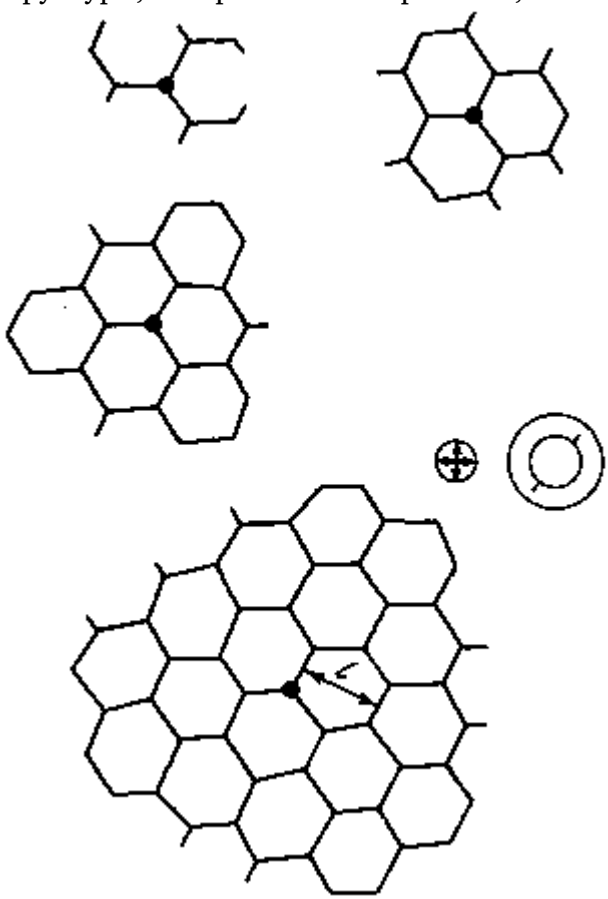


Рис. 106

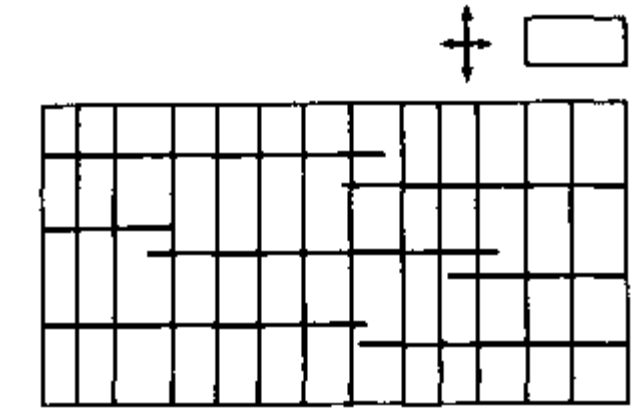


Рис. 107

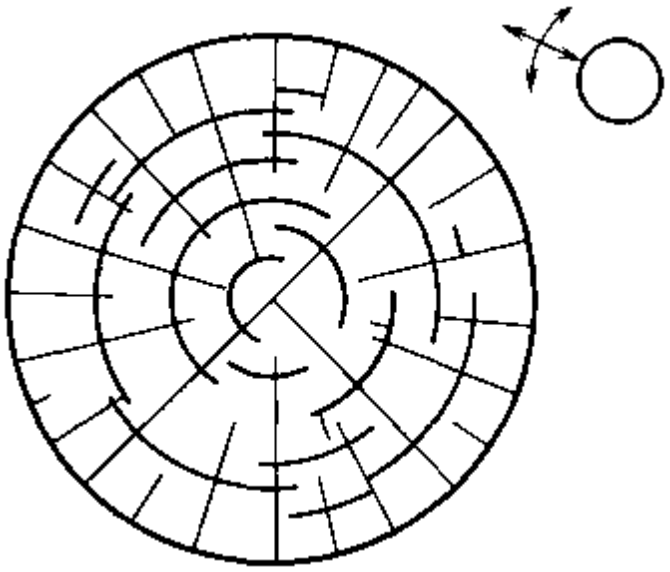


Рис. 108

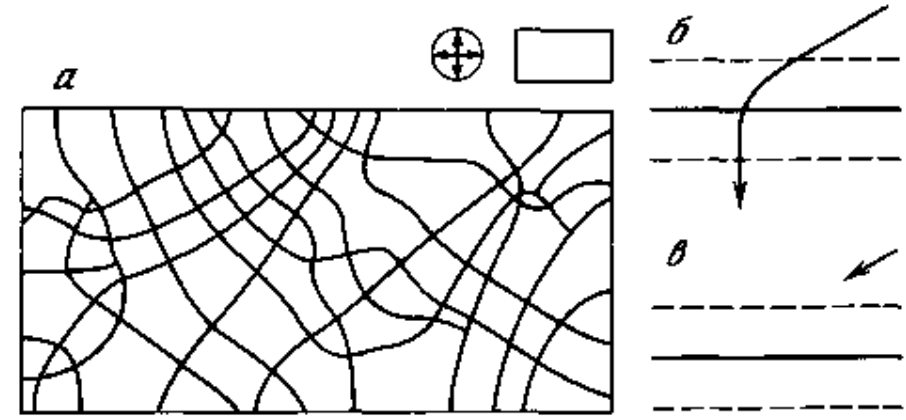


Рис. 109

В изотропном однородном поле при моментальном образовании элементов и условии разгрузки потенциала в направлении, параллельном элементу, возникнет структура, изображенная на рис. 109, а (ср. с рис. 103). Отметим важный момент. В этих условиях при косом заходе одного элемента в зону разгрузки другого он разворачивается и подходит к элементу перпендикулярно, соответственно после пересечения элемента он выйдет из зоны разгрузки (с другой стороны) уже под прямым углом (см. рис. 109, б, в). То есть по рисунку можно определить, куда двигался элемент.

Еще одно специфическое условие. В ранее рассмотренных примерах задавалось, что элемент в зоне разгрузки разгружает составляющую потенциала в направлении, параллельном элементу. В направлении же перпендикулярном величина потенциала оставалась неизменной. Теперь зададим, что в этом направлении возле элемента величина потенциала возрастает (или, что тоже бывает, снижаются значения пороговой функции). В таких условиях при появлении первого коротенького линейного элемента от него тут же перпендикулярно отойдут два новых — возникнет крестообразное сочленение. Новые элементы здесь уже образоваться не смогут, гак как взаимно-перпендикулярные элементы разгружают возле точки своего пересечения потенциал во всех направлениях. При дальнейшем удлинении элементов, как только их вершины отойдут от точки пересечения на величину большую, чем l, возникнут новые элементы — «притоки».

А теперь остановимся на двух примерах, показывающих развитие таких рисунков. Представим прямоугольный массив с однородным изотропным потенциальным полем $E < P$. Зададим границы структурными элементами лишь разгружающими массив

(без концентрации у кромки). Искусственно зададим в центре прямоугольника микронеоднородность, в которой появится одиночный элемент, в вершинах которого происходит высокая концентрация потенциала (такие элементы могут двигаться даже при условии $E < P$). Примем, что элементы не могут подходить один к другому и при встрече вершин стремятся разойтись. Это, например, может произойти, если элемент непосредственно возле своей вершины концентрирует потенциал, а на удалении разгружает его. Можно обеспечить это также тем, что потенциал вокруг вершины частично разгружается, а движется она за счет снижения «прочности» в вершине. При таких условиях сформируется структура, подобная изображенной на рис. 110. При ее разрастании постоянно возникает ситуация конкуренции, опережающее развитие одного элемента сдерживает другой, встречный.

Рассмотрим ситуацию, при которой конкуренция выражена в еще большей степени. Зададим на одной из сторон прямоугольника несколько глубоких затравочных неоднородностей, в которых возникнут элементы. Примем, что в пределах всего массива $E < P$, но поле неоднородно, у стороны с неоднородностями величина потенциала наименьшая. Остальные условия примем такими, как и в предыдущем примере. В этом случае возникшие здесь элементы будут стремиться к противоположной стороне. Причем чем дальше они продвинутся, тем выше будет скорость их движения, так как величина потенциала в этом направлении возрастает. В такой ситуации элемент, «вырвавшийся» вперед, для остальных недосягаем (рис. 111).

Если в этом же массиве поместить неоднородность в центре, то все элементы, зародившиеся в этой точке, будут стремиться развернуться в сторону максимального потенциала. При этом те из них, которые первоначально были ориентированы в этом направлении, для других недосягаемы (рис. 112).

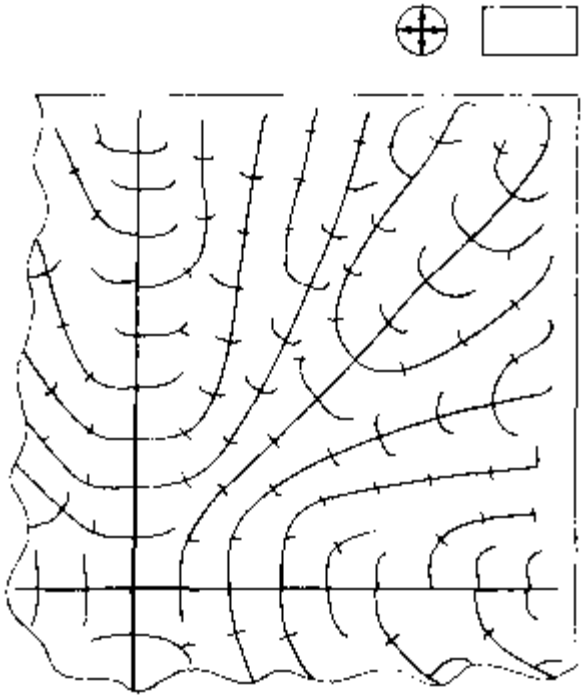


Рис. 110

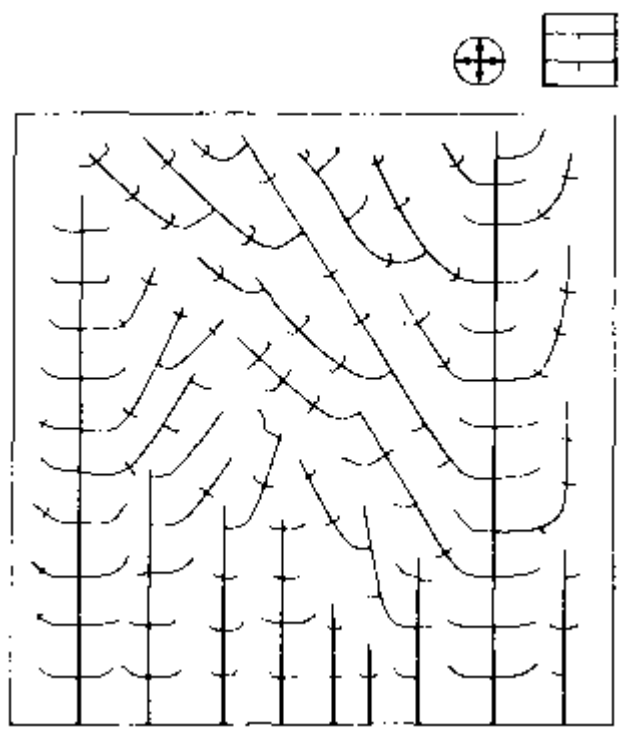


Рис. 111

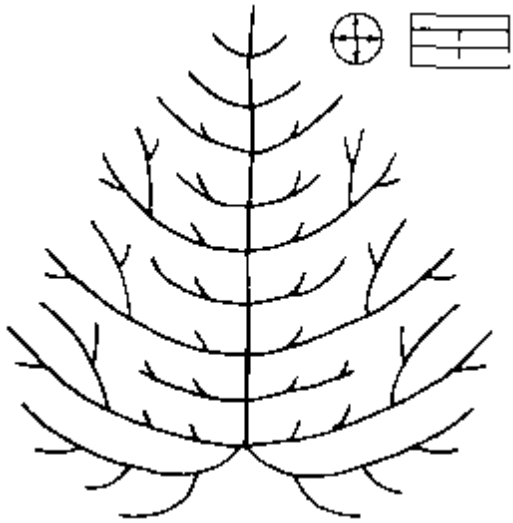


Рис. 112

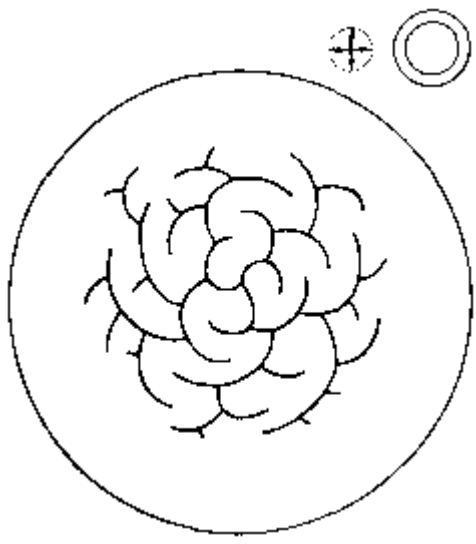


Рис. 113

Если потенциальный рельеф имеет вид конуса, то элементы, зарождающиеся на его вершине и появляющиеся при ветвлении, будут стремиться развернуться к центру (рис. 113). Если бы в последних примерах в потенциальном рельефе был задан гребень, то на нем бы образовалась доминирующая ветвь (ствол) структуры. А теперь представим, что во всех этих примерах с ветвлением появление на главной ветви бокового притока тут же исключает появление в этом месте притока с противоположной стороны. Облик рисунков не изменится, но притоки с разных сторон на главных ветвях будут расположены в противофазе.

Подчеркнем, что для образования сильно разветвленных структур необходимо, чтобы элементы могли «вырваться вперед» и захватить обширное поле ресурсов. В условиях внешне заданной смещающейся границы структурообразования элементы не могут за нее выйти, и сформируется множество тощих мало разветвленных ветвей.

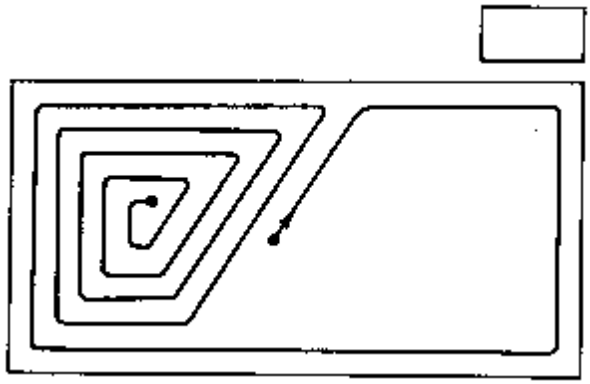


Рис. 114

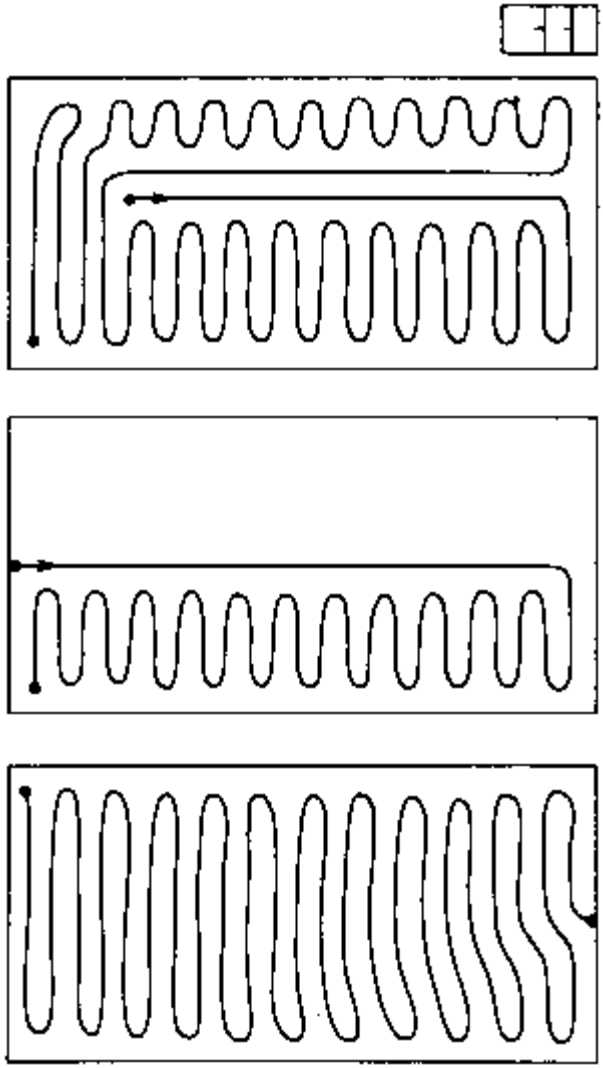


Рис. 115

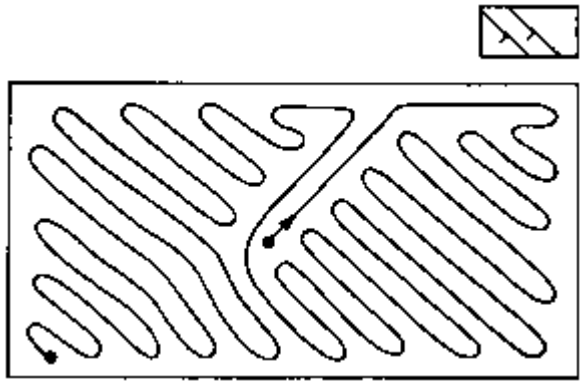


Рис. 116

Теперь рассмотрим еще один вариант создания рисунка. Зададим, что потенциал — скаляр, а в вершине элемента происходит сильная его концентрация. Движется вершина в сторону больших значений потенциальной функции и позади себя на ширину l полностью разгружает потенциал.

Подобные примеры мы рассматривали ранее, но там элементы возникали в точке $E = P$. Здесь же мы будем первичное положение элемента задавать сами, не дожидаясь, пока E достигнет P, и соответственно можем контролировать число элементов. Ограничимся пока одним элементом, причем примем, что движется лишь один его конец. Зададим, что вершина элемента не обладает инерцией (легко разворачивается) и движется даже при малых значениях потенциала. Останавливается она лишь тогда, когда в ее окружении везде $E = 0$, т. е. мы приняли очень высокую концентрацию потенциала в вершине элемента. Структуры, возникающие в этих условиях, показаны на рис. 114—119. На рис. 120, 121 показаны структуры, возникающие при одновременном появлении двух точек. На этих рисунках мы видим, как элементы, полностью разгрузив потенциал в доступном пространстве, останавливаются. Теперь зададим, что на линии потенциал разгружен полностью, а при удалении от него степень разгрузки линейно снижается и на расстоянии l потенциал совсем не разгружен. В этом случае между двумя параллельными следами всегда будет оставаться гребень ненулевых значений потенциала, и элемент будет иметь возможность выйти из тупика по этому гребню. Дальнейшее развитие некоторых из только что рассмотренных структур до стадии появления элементов третьей генерации показано на рис. 122, 123.

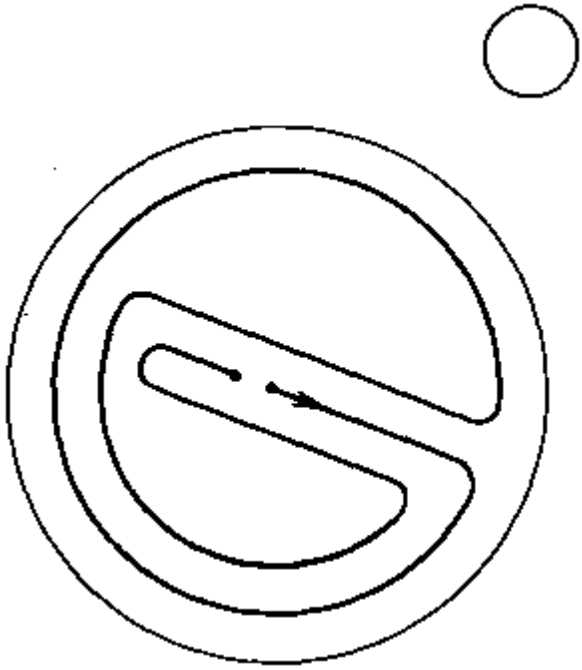


Рис. 117

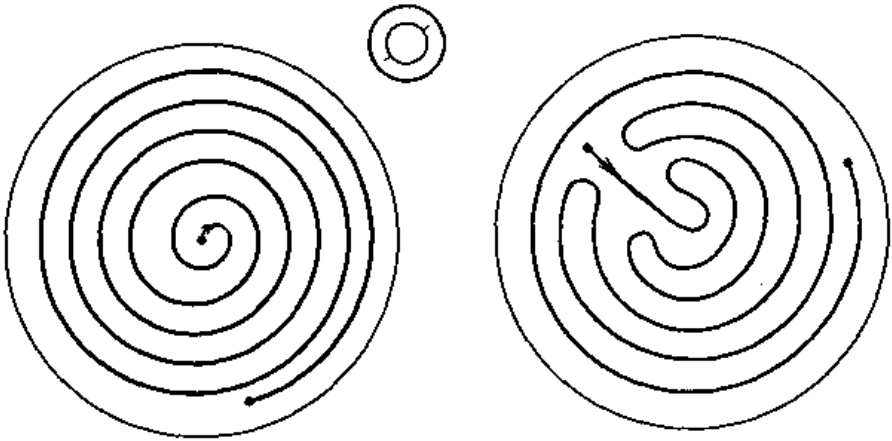


Рис. 118

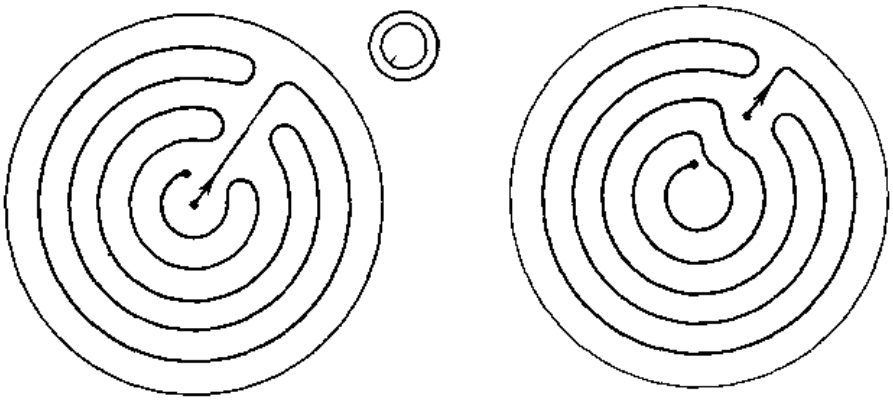


Рис. 119

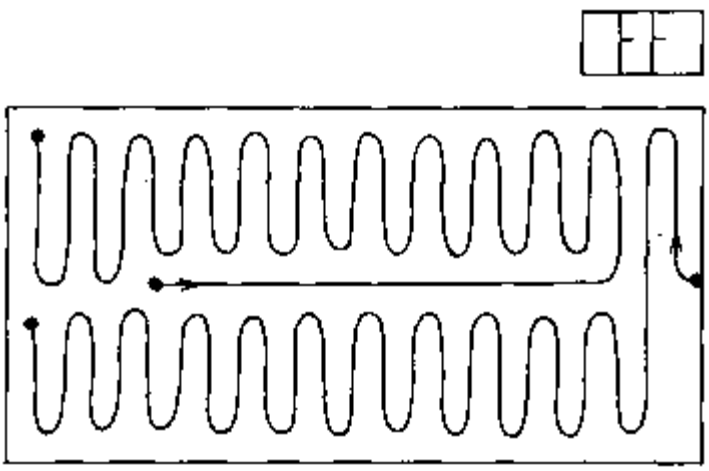


Рис. 120

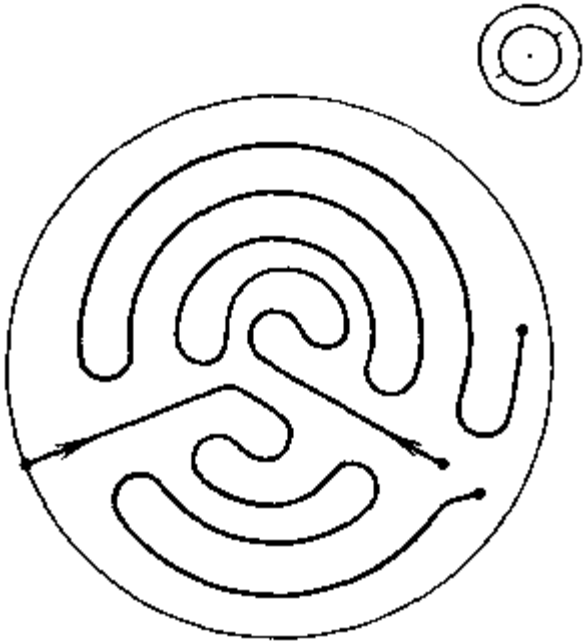


Рис. 121

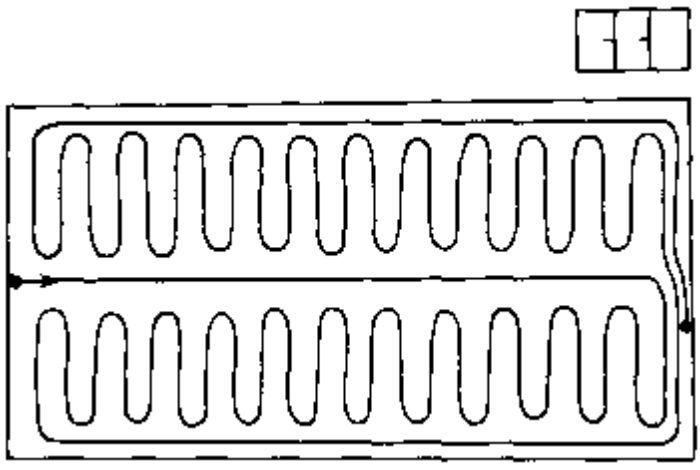


Рис. 122

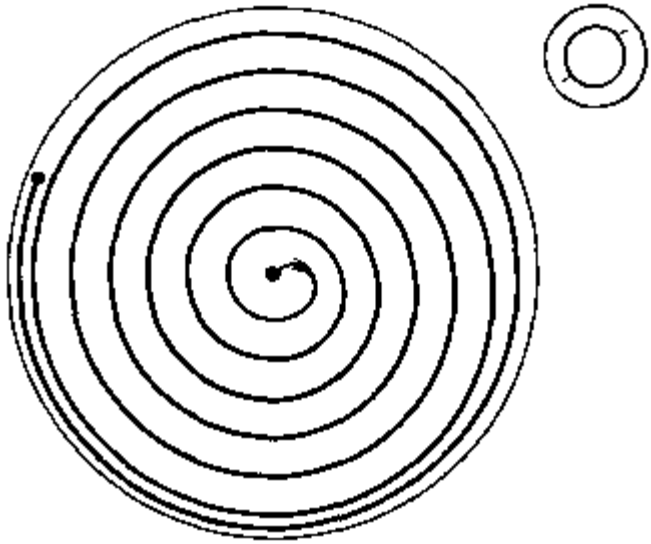


Рис. 123

Вариантов пороговой и потенциальной функций и их разгрузки можно задать неограниченно много, соответственно и многообразие рисунков бесконечно.

Мы рассмотрели и показали лишь простейшие, элементарные рисунки, составленные из линейных элементов, — задавались фиксированная ширина зоны разгрузки и линейное распределение ее величины. Но возможны и другие варианты. Например, можно задавать, что ширина зоны разгрузки зависит от длины элементов или от значений потенциала в этой точке. От длины элемента может зависеть и степень концентрации потенциала в его вершине. Величины разгрузки соседних элементов могут быть взаимосвязаны, например, могут суммироваться. Ширина зоны разгрузки с одной стороны элемента может отличаться от разгрузки с другой. Появление бокового притока может стимулировать его появление с противоположной стороны, а может и наоборот — исключить. Потенциальный рельеф по мере своего воздымания может изменять свою общую первоначальную конфигурацию. Со временем может измениться и направление главной составляющей потенциала. Все эти варианты мы рассматривать не будем. Оставим для самостоятельного изучения и задачу о развитии в одном пространстве взаимосвязанных линейных элементов разной природы. При желании читатель, наверно, и сам сможет конструировать соответствующие этим условиям абстрактные структуры. Сейчас же вернемся к конкретным рисункам.

Паутины трещин

Этот раздел посвящен структурам разрывного типа. Поверхностные трещины в непосредственной близости от себя полностью разгружают напряжения в направлении, перпендикулярном трещине, а в параллельном направлении — лишь частично. В первом приближении при упругом поведении среды степень разгрузки в этом направлении можно охарактеризовать величиной коэффициента Пуассона. Если растягивать брусок, то одновременно с этим он становится тоньше. Коэффициент Пуассона показывает отношение этих деформаций. Теоретически он не может превышать 0,5. Это значит, что разгрузка напряжений возле трещины в направлении, параллельном ей, не может превышать 50% от первоначальных напряжений. Разброс этой величины у разных материалов относительно небольшой, обычные значения — 0,25—0,35. Минимальные значения у кварцевого стекла — 0,17, а значения, близкие 0,5, наблюдаются у гелей (это, например, обычный студень или желе). Гель — жидкость, запечатанная в тонкий упругий каркас. А жидкость объемно несжимаема, поэтому коэффициент Пуассона у гелей почти 0,5. Шкала узкая — 0,17—0,5. Но эти различия для рисунка структуры могут быть важными. При микронеоднородности среды трещина неровная, на ее берегах возникают локальные участки концентрации напряжений. В этом случае при малом значении коэффициента Пуассона у берега трещины в перпендикулярном ей направлении напряжения почти не разгружены, и за счет концентрации напряжений на сколах трещины от нее могут отходить боковые притоки, т. е. возможен вариант ветвящейся структуры. Если же этот коэффициент близок к 0,5, то трещины будут редко подходить одна к другой и полосы между параллельных трещин будут разбиваться поперечными только при сильном дополнительном наращивании напряжений. В итоге могут возникнуть структуры, близкие к рассмотренным выше идеализированным структурам, у которых элемент вблизи себя разгружает потенциал во всех направлениях — вплоть до спиралей (см. рис. 94—100).

На материалах со средними значениями коэффициента Пуассона возможно и то, и другое. Но обычно боковые притоки отходят от трещин лишь на их крутых поворотах, а трещины, заходящие в зону разгрузки другой трещины, часто вязнут и не доходят до нее. Это главные особенности взаимоотношения трещин отрыва. И еще — одна трещина не может пересечь другую.

Анализ абстрактных рисунков мы начали с рисунков, появившихся в резко анизотропном поле. Примером развития рисунка трещин усыхания в таком поле может быть обычная сырая доска, лежащая под лучами жаркого солнца. На ней из-за резкой анизотропности прочностных свойств будут развиваться только продольные трещины. Если ту же доску бросить в костер и дать ей обуглиться, то на поверхности угля мы можем увидеть тетрагональные сетки трещин, соответствующие схеме, изображенной на рис. 71, 72, а схемы рис. 78—80 можно наблюдать на срезе бревна. То есть степень анизотропности древесного угля меньше, чем продольного среза дерева. Такие же рисунки, как на схемах 71, 72, мы можем увидеть и на комбинированных средах (доска, покрытая слоем старой масляной краски). Здесь анизотропность доски задает направление генеральных трещин на краске, они идут вдоль волокон дерева. Но если мы будем рассматривать трещины на узких окрашенных деревянных брусках, то здесь генеральные трещины будут идти поперек древесных волокон, потому что грани бруска разгружают поперечные растягивающие напряжения. Если брусок пошире, то у краев трещины будут его пересекать, а ближе к центру пойдут вдоль (рис. 124), как на реальном рисунке (балконная дверь).

А теперь попытаемся промоделировать развитие рисунка в изотропном поле. В этой ситуации трещина движется в сторону больших значений напряжений и, зародившись на вершине потенциального рельефа, она стремится вернуться к ней. Возьмем круглую чашку и нальем в нее однородную пасту мела. При ее высыхании должны появиться напряжения, одинаковые во всех направлениях. Но мы уже проводили этот эксперимент (см. рис. 5—8) и в итоге получили различные рисунки. Если мы полистаем абстрактные разделы азбуки, то найдем подобные рисунки в разделе «Прямоугольные решетки». Это анизотропные условия. И действительно, паста мела лишь кажется изотропной. Когда мы выливали пасту в чашки, то при ее растекании частицы мела неизбежно приобретали упорядоченную ориентировку, в результате свойства массива стали анизотропными. Для того чтобы паста, вылитая в кювету, легла ровным слоем, ее приходится разравнивать. В первом случае пасту немного постукивали о стол (см. рис. 5). При этом массив не приобрел макроанизотропных свойств, но на локальных участках сохранилась анизотропность, полученная при движении пасты во время первоначального растекания. Во втором варианте (см. рис. 6) чашки несколько раз наклоняли из стороны в сторону, в третьем (рис. 7) — их покачивали, проворачивая вокруг оси, а в

четвертом — паста разравнивалась за счет легкого постукивания по ее поверхности в центре чашки. Все эти движения запечатлелись в порогово-потенциальном поле и проявились в рисунках. И чем более однородны условия, тем с большей вероятностью проявляется малейшая анизотропность.

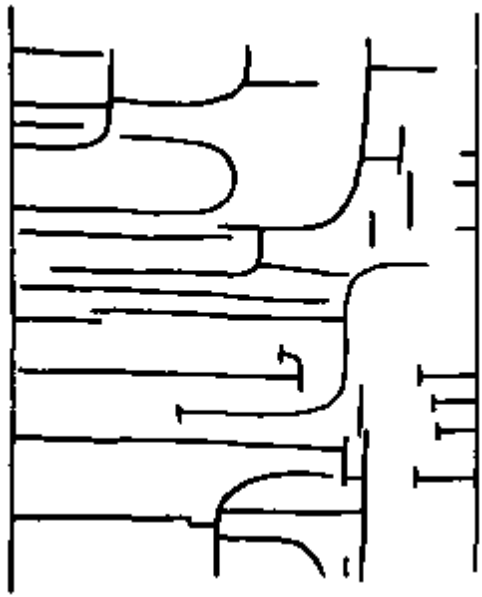


Рис. 124

Заставить трещину двигаться в сторону больших значений потенциала можно, лишь создав сильные градиенты напряжений. Иначе трещина «увидит» анизотропность напряжений раньше, чем их градиент. Паста мела для этой цели — неудачная среда. Мел обладает высокой гигроскопичностью, поэтому резкую границу фронта усыхания (высокие латеральные градиенты влажности и напряжений) здесь создать трудно; даже при локальном нагреве массива высокое испарение в этом месте компенсируется быстрым подтягиванием влаги из соседних областей. В результате резкую смещающуюся границу структурообразования получить в этой среде трудно.

На рис. 125 показана структура, появившаяся на пасте мела, зажатой между двух стекол. Влага отсюда уходила только через боковой периметр, но и в этом случае резкий фронт усыхания не возникал. Некоторые трещины вырывались к центру структуры и быстро «нащупывали» анизотропность, связанную с растеканием пасты при сдавливании стеклами.

На рис. 126 видим результаты моделирования при наименее анизотропных условиях — сухой порошок мела насыпался в воду через сито без всякого перемешивания. Трещины здесь

зародились на двух вершинах очень пологих холмов потенциального рельефа. Это первые трещины, в последующем, по мере роста напряжений, появились и другие.

Изотропное поле можно создать, напылив пасту из пульверизатора. На рис. 127 видна структура трещин, появившаяся на поверхности эмали, напыленной на гладкий металл. Развивались эти структуры в режиме смещающейся границы. Зарождались трещины большей частью на выпуклой стороне других трещин (здесь наибольшая концентрация напряжений) и тут же стремились развернуться назад.

Многие природные рисунки, связанные с трещинами усыхания, возникают путем многократного повторного растрескивания. При обводнении массива полигоны разбухают, трещины заплывают, закрываются, но рисунок в виде канавок сохраняется. При последующем высыхании водоема трещины в большинстве случаев образуются по этим канавкам, но зачастую в другой последовательности. При этом если вторичная трещина в Т-образном сочленении образуется первой, то она пересекает канавку и в итоге формируется крестообразное сочленение (+). Заплывшая трещина ослабляет массив, но не разгружает напряжения, поэтому новая трещина при подходе к ней под углом не разворачивается и не меняет направление — формируется Х-образное сочленение трещины и старой канавки.

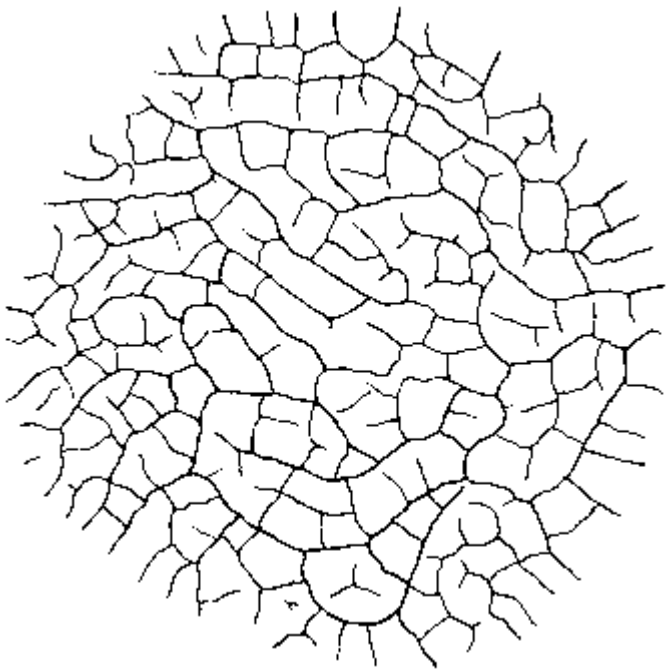


Рис. 125

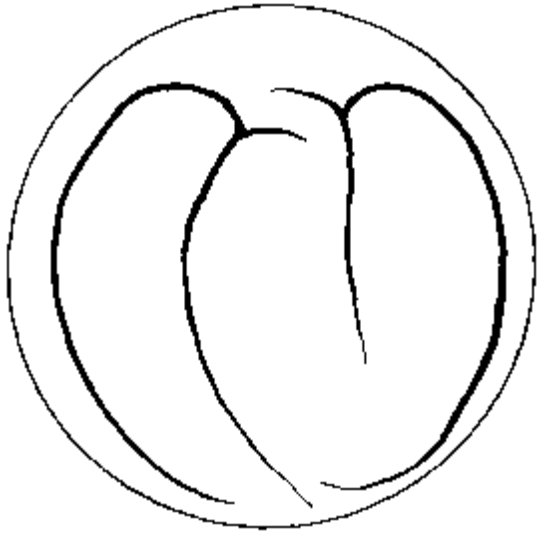


Рис. 126

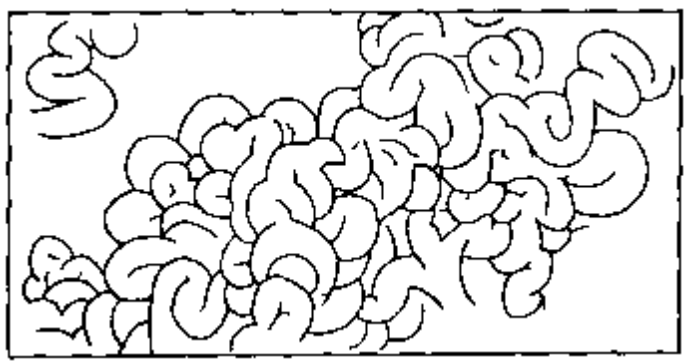


Рис. 127

При моделировании процесса многократного повторного обводнения и растрескивания массива в итоге получается рисунок канавок «более округлый» по сравнению с первоначальной сетью трещин и с более выдержанными по размерам полигонами, так как канавки, разделяющие небольшие полигоны, повторно не трескаются и заплывают. В итоге рисунок немного приближается к энергетически выгодному гексагональному.

Тройное, близкое к равноугольному, сочленение чаще всего возникает в массивах с мезонеоднородным полем напряжений — при «бугристо-западинном потенциальном рельефе» (см. рис. 84). Такой рельеф может возникнуть даже в однородных средах при быстром промачивании массива, когда верхний слой набухает и препятствует выходу воздуха из нижележащих горизонтов. При этом возникает ситуация «гравитационной неустойчивости», при

которой встречные потоки влаги и воздуха формируют подобие конвективных ячеек, в последующем трещины огибают эти ячейки. При моделировании трехлучевые сочленения часто возникают в местах, где в среде были зажаты пузырьки воздуха.

Ширина зоны разгрузки вокруг трещин первой генерации зависит от их глубины: чем она больше, тем больше размер решетки. В рассмотренной нами модели глубина трещин задана глубиной слоя пасты мела. Мели же мощность деформируемого слоя велика, то глубина трещин зависит от вертикального градиента напряжений. Чем больший слой материала напряжен (чем меньше градиент напряжений), тем глубже проникнет трещина.

В первом приближении для трещин усыхания можно принять, что они проникают до глубины, на которой отсутствуют растягивающие напряжения. Если эта граница со временем опускается, то и трещины углубляются. В случаях, когда трещины имеют возможность неограниченно углубляться, получить на поверхности трещины второй генерации трудно. Поэтому, если мы в природе, например на мощных илистых отмелях, видим рисунок, состоящий из трещин разных размеров, то это чаще всего одна генерация, у которой некоторые трещины в режиме конкуренции увеличили свою глубину и ширину.

А теперь вернемся к тому, с чего начали азбуку, — к морозобойному растрескиванию мерзлых грунтов. Для формирования морозобойных решеток необходим субстрат и определенный температурный режим. В зависимости от того, какой из этих факторов первичен, решетки можно разделить на эпигенетические и сингенетические.

В криолитозоне решетки эпигенетического вида возникают при прорыве и быстром спуске термокарстовых озер, при быстром появлении над уровнем реки обширных островов, на участках, где сведен лес и из-за уплотнения снега понизилась температура грунтов. Эффект смещающейся границы в этом случае проявится плохо, так как мезо- и микрорасчлененность потенциального рельефа в реальных ситуациях в большинстве случаев будет превышать его макронаклоны. В речных долинах, на участках пойм и террас с развитием гривного рельефа, где свойства грунтов анизотропны, возникнут решетки с большим числом прямоугольных ячеек. Общий каркас этих решеток будет задаваться рисунком современных и древних прирусловых валов. Различные уступы и бровки в непосредственной близости к ним также могут быть окружены преимущественно тетрагональными решетками. На других же участках, где анизотропность свойств выражена не столь явно, упорядоченность в ориентации

элементов решетки может быть выявлена лишь статистическими методами.

Часто на вновь возникших обширных массивах потенциальный рельеф даже в наиболее суровые зимы не поднимается до порогового уровня, но такие массивы могут осваиваться трещинами окружающей территории. Там они возникают по ослабленным зонам существующей морозобойной решетки и «с разгона» проникают в новый массив. Это явление связано с тем, что прочность на разрыв полигонально-жильных блоков меньше, чем прочность ненарушенного массива. Если же вокруг нового массива нет регулярно растрескиваемых решеток, то этот массив может длительное время не покрываться трещинами.

В речных долинах криолитозоны основная часть полигональных решеток является сингенетической. Они медленно достраивались по мере наращивания и промерзания берегов рек и озер. Поэтому характер рисунков в долине всецело определяется особенностями напряжений в узкой полосе, примыкающей к берегу. Заложенные здесь элементы рисунка в последующем почти не меняются. В этой полосе величина температурных напряжений уменьшается по направлению к берегу, и потенциальный рельеф здесь круто наклонен, поэтому микро- и мезонеоднородности эффект смещающейся границы не затушевывают. Благодаря этому морозобойные решетки озерно-аллювиальных равнин отличаются высокой регулярностью элементов.

При изотропном поле напряжений вблизи берега трещины, подходя к нему, должны разворачиваться. Однако эта ситуация реализуется редко. Выпуклые, относительно крутые берега частично разгружают напряжения в параллельном себе направлении, поэтому трещины подходят к ним под прямым углом. На пологих берегах обычно присутствуют различные неоднородности, параллельные берегу, — волноприбойные уступы и террасы, песчаные гривы. Они задают положение протяженных, параллельных берегу трещин. Между этой трещиной из-за вызванной ею анизотропной разгрузки и берегом поле напряжений становится анизотропным — трещины, образующиеся здесь, перпендикулярны берегу. Так как ширина зоны разгрузки морозобойных трещин теоретически бесконечна, то полоса между берегом и параллельной ему трещиной остается анизотропной даже в то время, когда он значительно удалился от этой трещины. Поэтому перпендикулярные берегу трещины удерживаются анизотропным полем напряжений от разворота. Образование новой, параллельной берегу трещины вновь

усиливает анизотропность напряжений вблизи берега и т. д. И лишь у ровных пологих берегов, плавно уходящих под урез воды, трещины при подходе к нему разворачиваются, формируя структуры, подобные изображенным на рис. 104, 105.

По мере отступания берегов их крутизна может изменяться, часто периодически (так формируются пойменные массивы с гривным рельефом). В этом случае возникают комбинированные рисунки, в которых полосы с прямоугольными ячейками разделены зонами, где форма полигонов близка к гексагональной.

При единовременном образовании трещин формируются Т-образные сочленения. Но большинство наблюдаемых морозобойных рисунков образовано при многократном повторном растрескивании, при этом из-за различий в последовательности образования трещин такие сочленения превращаются в крестообразные. В этом случае определить, какой из двух пересекающихся элементов возник первым, трудно.

При резких температурных перепадах морозобойные трещины образуются и на поверхности озерного и морского льда. Во льду напряжения очень быстро релаксируют, и часто трещины под весом самого льда быстро закрываются и залечиваются за счет его перекристаллизации. В последующем новая трещина эту залеченную может пересекать под любым углом. Поэтому рисунок, наблюдаемый на льду к концу зимы, состоит из нескольких взаимно несвязанных наложенных одна на другую разновозрастных структур.

Наиболее простая среда для моделирования морозобойного растрескивания — это слой стеарина или воска, нанесенный на жесткую пластину. У этих материалов высокий коэффициент температурного расширения. Но и для их растрескивания необходима температура ниже —30° С. Для тех же, кто живет не в Сибири, можно порекомендовать обычное оконное или бутылочное стекло (коэффициент Пуассона — 0,25). Нагрейте кусок стекла до красна и облейте его водой. Поверхностный слой стекла в результате резкого охлаждения сожмется и покроется мелкой сеткой поверхностных трещин. В зависимости от того, как и куда вы льете воду, на одном и том же куске стекла можно получить параллельные и расходящиеся полосы, рисунок, похожий на пчелиные соты, систему кругов, фрагменты кирпичной кладки, рисунок, близкий к рисунку по эмали. Все эти рисунки, кроме последнего, можно получить на стекле и не нагревая его.

Если изогнуть лист стекла, то одна его поверхность будет растянута, другая сжата, и трещины будут развиваться лишь в

растянутом слое, т. е. будут поверхностными. В результате вторичных напряжений эти трещины разорвут и нижний, ранее сжатый слой. Но если кусок стекла зажат между мягких поверхностей, то можно получить нерассыпавшийся образец с поверхностными трещинами. Простейший вариант опыта — зажать пластину стекла между двух книг и сильно ударить молотком в центр. Удар создаст на нижней поверхности стекла растягивающие напряжения. Раскрывайте книгу и читайте рисунок. Присмотритесь с лупой к длинным разбегающимся лучевым трещинам. От них, как веточки, отходят маленькие трещинки.

Другой интересный объект для чтения — закаленные стекла, например автомобильные (те, что рассыпаются на мелкие призмы). У таких стекол внутренний слой находится в состоянии растяжения, наружный — в состоянии сжатия: внутренний слой стягивает наружный. Трещины в этом материале возникают во внутреннем слое. Рисунок на таком стекле развивается в режиме самоветвления за счет концентрации напряжений на сколах.

Рисунки на сковороде

В синергетике классический пример организации упорядоченных структур — это ячейки Бенара. Возникают они в слое вязкой жидкости, подогреваемой снизу. При большой разности температур более тонкая и потому легкая жидкость снизу стремится поменяться местами с более холодной поверхностью. Эта гравитационная неустойчивость приводит к формированию конвективных ячеек. В литературе описание процесса появления ячеек Бенара часто приводится в следующем виде: «Для того чтобы экспериментально изучать структуры, достаточно иметь сковороду, немного масла и какой-нибудь мелкий порошок, чтобы было заметно движение жидкости. Если дно сковороды плоское и нагреваем мы ее равномерно, то можно считать, что у дна и на поверхности поддерживаются постоянные температуры. Пока разность температур невелика, жидкость неподвижна. Будем плавно увеличивать температуру. Как только разность температуры на подошве и поверхности жидкости превысит некоторую критическую величину, зависящую от свойств жидкости и ее глубины, вся среда разбивается на правильные шестигранные ячейки, в центре каждой из них жидкость движется вверх, по краям — вниз. Если встряхнуть сковороду, разрушив этим ячейки, то очень быстро будет восстановлена прежняя картина».

Вы заметили, что постановка задачи в только что описанном эксперименте подобна постановке задачи о растрескивании у мерзлотоведов — задается (предполагается) однородная среда. В таких условиях разность температур достигнет критического значения по всему пространству одновременно, и везде в случайных местах должны возникать конвективные ячейки, но они подвижны, и поэтому в однородных условиях может сформироваться строго упорядоченная картина. Но на сковороде создать однородные условия невозможно, очень сложно создать равномерный нагрев, не менее сложно обеспечить равномерный тонкий слой жидкости, а ведь величина критического градиента температур, при котором появляются ячейки, в соответствии с числом Рэлея, зависит от толщины слоя жидкости в четвертой степени. В реальности все сложнее, и если вы захотите провести этот эксперимент так, как он только что был описан, т. е. на сковороде, то правильные шестиугольники у вас не получатся, и каждый раз после встряхивания сковороды будут возникать новые рисунки.

Давайте порассуждаем. Рассмотрим такой вариант: пусть на

сковороде градиент температуры везде меньше критического. На небольшом точечном участке увеличим нагрев так, чтобы градиент температуры здесь достиг критического, тогда над этой точкой образуется восходящий поток нагретой жидкости, вокруг него — кольцевой нисходящий: образуется одна элементарная конвективная ячейка (у конвективных ячеек горизонтальный размер сравним с толщиной слоя жидкости). Крупицы порошка, рассыпанные по дну сковороды, будут увлекаться придонным течением жидкости к центру восходящего потока, и здесь эти крупицы соберутся в маленький бугорок. В новом варианте зададим, что нагрев сковороды неравномерен, в центре он максимален, а к краям плавно снижается. В этой ситуации при общем увеличении нагрева первая ячейка должна появиться в центре (в вершине конуса потенциального рельефа), последующие — по его периметру и т. д.

Теперь представим, что на сковороде везде градиент температуры немного меньше критического, но в каком-то месте из-за локальной неоднородности появилась одиночная ячейка. Эта ячейка в примыкающей области нарушает стратификацию жидкости, т. е. создает неоднородность и этим может спровоцировать появление рядом новых ячеек (циркуляция жидкости в первой ячейке вызовет циркуляцию в своем окружении). Эти ячейки, в свою очередь, спровоцируют появление следующих. В итоге все пространство покроется ячейками.

Самоусиление потенциала в окружении первой ячейки может происходить за счет нисходящего потока этой ячейки. Этот поток разворачивается не только к центру первой ячейки, но частично и в ее окружении, вызывая новые восходящие потоки. Но возможен и еще один механизм.

Конвекция начинается с появления «на поверхности» нижнего легкого слоя жидкости небольшого бугорка. Бугорок, являясь неоднородностью, провоцирует поднятие окружающей его легкой жидкости — стремится расшириться. Но для своего роста он должен подтягивать к себе легкую жидкость и тем самым уменьшать вокруг толщину ее слоя, этим он препятствует своему расширению. Пока бугорок маленький (имеет малый радиус), преобладает процесс расширения. Теперь представим, что первичный бугорок случайно имеет в плане вытянутую форму. В этом случае его узкие концы будут активно провоцировать возле себя поднятие легкого вещества. Радиус кривизны бугорка здесь небольшой, поэтому истончение легкого слоя в этом месте также небольшое, и это не должно препятствовать поднятию вещества у узкого края вытянутого бугорка. За счет этого эффекта первичный бугорок может активно вытягиваться. В итоге в рельефе

«поверхности» нижнего легкого слоя сформируется разрастающаяся в длину складка (гребень), окруженная параллельными ей прогибами. Концы этого гребня должны удлиняться в том направлении, в котором состояние среды ближе к критическому. Развитие линейных элементов при такой схеме должно быть подобно развитию складок в сжато-напряженном упругом слое.

Восходящий поток вещества вдоль этого гребня может стать неустойчивым. В каком-то месте гребня скорость движения жидкости может оказаться немного больше. Для этого сюда необходим дополнительный подток теплого придонного вещества, но его количество ограничено, поэтому появление вершины создает рядом на гребне две седловины и соответственно две новые вершины. Их образование будет связано и с компенсационной активизацией нисходящих потоков тяжелого вещества, окружающих первую вершину.

Теперь после этих предварительных рассуждений перейдем к эксперименту со сковородой. Масло можно взять любое (лишь бы оно не брызгалось), а в качестве порошка можно взять муку (более тяжелые порошки будут лежать на дне неподвижно). Сковороду лучше взять алюминиевую — на светлом фоне сковороды рисунки из темной прожаренной муки лучше заметны. Масло лучше налить слоем 2—3 мм; чем тоньше слой, тем ярче рисунок и больше число ячеек. Сковороду лучше взять самую маленькую — из детского набора (при больших размерах трудно выдержать равномерность толщины слоя масла и трудно охватить взглядом весь рисунок). Перед каждой установкой сковороды на плитку муку необходимо распределить по всей поверхности равномерно. Это в эксперименте может оказаться самым трудным. Муку можно разровнять кисточкой, а можно наклонить или резко сдвинуть сковороду, создавая течение масла.

Итак, сковорода на раскаленной плите. Во всех экспериментах вы отчетливо увидите эффект смещающейся границы структурообразования. Зарождаясь на участке наибольшего нагрева (в точке наиболее плотного касания плиты), рисунок расширяется на все пространство. При наиболее однородных условиях нагрева на это требуется одна — три секунды. Если же задать высокий латеральный градиент (например, поставить сковороду на плиту лишь одним краем, а второй на что-нибудь опереть так, чтобы большая часть сковороды находилась не над плитой), то потребуется 30—60 секунд. Помимо латерального градиента температуры, эффект смещающейся границы обусловливается неравномерностью толщины слоя масла. При относительно равномерном нагреве

первые элементы появляются там, где он тоньше, так как здесь выше вертикальный градиент температуры. Возникновение рисунка чаще всего начинается с появления линейных элементов. На дне под протяженными гребнями восходящих потоков за счет подтягивания сюда порошка появляются слабо выраженные темные полосы, они бегут по дну сковороды, как трещины. Эти полосы тут же по мере своего продвижения разрываются, превращаясь в цепочку точек. Чаще всего линейные элементы и цепочки образуют разноориентированные серии из нескольких параллельных линий. Зачастую они ориентированы параллельно краю сковороды.

Ориентация полос и цепочек из точек связана с неоднородностями в распределении частичек муки. При их перемешивании на дне образуется полосчатость, пусть даже почти незаметная, и конвективные валы идут вдоль этих полос. На направлении конвективных валов сказывается и ориентация частиц муки. Достаточно несколько раз немного наклонить сковороду в каком-либо направлении, так чтобы порошок сдвигался взад — вперед по дну, и темные полосы возникнут в этом же направлении.

Со временем первоначальный рисунок перестраивается, и можно увидеть ориентировку, связанную с макротечениями жидкости. Если нагрев сковороды неравномерен, то в зоне наибольшего нагрева объем вещества увеличивается, вся жидкость здесь приподнимается и создается наклон в сторону менее нагретой части. Из-за этого жидкость приходит в движение. В простейшем варианте от сильно нагретого края она по прямой движется к противоположному, там поток раздваивается, и вдоль стенок сковороды возвращается назад. Если бы дно сковороды было идеально ровным, а масло чистым, то вместе с этим потоком смещались бы и конвективные ячейки. Но сами ячейки создают неравномерную температуру дна сковороды, под восходящим потоком она выше. В нашем эксперименте к тому же в центре каждой ячейки образуется бугорок из муки, и ячейке трудно сместиться относительно этого места, она к этому бугорку «привязана».

При отсутствии общего течения в жидкости восходящий и нисходящий потоки в ячейке вертикальны, если же возникло течение, то эти потоки наклоняются — их сносит течение. Вертикальный поток в ячейке, поднимаясь к поверхности, расходится во все стороны и стремится тут же опуститься. Но та часть потока, которая пошла вниз по течению, не может опуститься, потому что ее снесло и под ней оказался вертикальный поток другой ячейки. А та часть потока, которая

пошла вверх по течению, не может опуститься, потому что ее тоже снесло и под ней сказывается вертикальный ноток собственной ячейки. И лишь расходящиеся в стороны потоки могут опуститься. В итоге нисходящие потоки между ячейками в направлении течения вырождаются, и система конвективных ячеек медленно перестраивается в систему ориентированных вдоль течения валов — появляется полосчатый рисунок (рис. 128, а).

Отметим, что скорость макротечения на поверхности в таком эксперименте нигде не превышает 1 мм/с. Одновременно с полосами на участках сковороды, где отсутствуют сильные течения, могут быть области, покрытые точками (см. рис. 128, б).

Как видим, и развитие конвективных структур также задается особенностями потенциального рельефа и анизотропными свойствами потенциала.

Если частицы порошка очень мелкие, то на сковороде можно увидеть и тонкие линии, маркирующие шестигранную сеть нисходящих потоков вокруг этих точек. Но эти шестиугольники чаще всего будут неправильными, да и углов в них может быть не шесть, а пять, четыре или три.

В эксперименте с маслом и мукой сеть нисходящих потоков видна плохо. Но если взять сковороду побольше и разогреть в ней воск, а затем снять ее с огня и дать ей медленно остывать, то со временем поверхность воска затвердеет, причем в первую очередь затвердеет воск над нисходящими потоками конвективных ячеек. В результате сформируется сеть прожилок, очень похожая на сеть трещин. Достаточно малейшей анизотропности, и субпараллельные магистральные прожилки тут же ее выявят. На рис. 129, а показана структура, появившаяся при застывании воска в небольшой сковороде (слой воска 2 см), а на рис. 129, б — центральный фрагмент структуры в большом тазу при слое воска 4 см. Анизотропность, связанная с краевым эффектом, в этом месте отсутствовала. Здесь возникает вопрос: какую же абстрактную схему использовать для описания формирования конвективных рисунков — точечную или линейную?

Сковородой можно воспользоваться и для моделирования рисунков ряби течений. Налейте в нее воду и рассыпьте по дну легкий порошок. Если сковорода белая, то лучше взять мелкий порошок угля, если черная — муку. Если сковороду начать немного раскачивать от одного края к другому, то появятся знакопеременные течения. Как только их скорость достигнет некоторой критической величины, частицы порошка, лежащие на дне, придут в движение и тут же начнут сгущаться в мелкие короткие полоски, ориентированные поперек течения. Связано

это с тем, что средняя скорость придонного течения, набегающего на препятствие, перед ним выше, чем позади. Бугорок тормозит течение. В результате средняя скорость частиц порошка при их движении к препятствию выше, чем скорость удаления от него. В итоге результирующая знакопеременного движения частиц направлена к их первичному небольшому скоплению. Наибольшие скорости течения наблюдаются в центре сковороды, поэтому первые элементы начнут зарождаться здесь. По мере роста скоростей потоков рисунок будет расширяться. Полоски будут удлиняться, конкурировать за частицы порошка, рассыпанные по дну, некоторые из них будут поглощены более крупными, и в скором времени сформируется система субпараллельных гряд, ориентированных поперек течения (отметим, что строго параллельные гряды, пересекающие все пространство, могут появиться лишь в прямоугольной посуде).

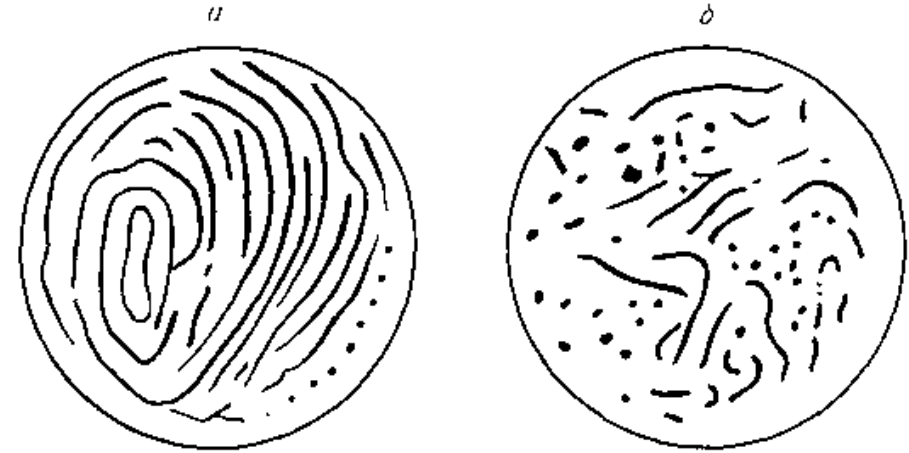


Рис. 128

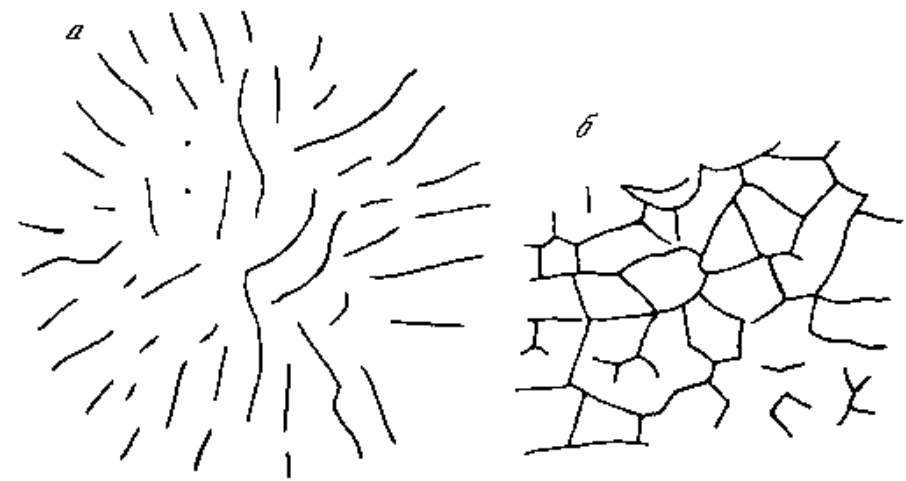


Рис. 129

Можно задать другое поле течений. Например, раскачивать воду с помощью большой ложки, надавливая ею на поверхность воды в центре сковороды. Тогда появится рисунок гряд, расположенных концентрическими кругами вокруг центра сковороды. (Для того чтобы сформировать рисунок, не обязательно все время раскачивать сковороду. Достаточно один раз раскачать воду, и рисунок успеет сформироваться за время затухания колебаний.)

Рассмотренные рисунки появились в резко анизотропном поле — частицы двигаются по дну лишь вдоль одного направления. Но можно задать и изотропное поле скоростей, при котором частицы равно смещаются во всех направлениях. Для этого надо, не меняя ориентации сковороды, двигать ее по окружности так, чтобы частицы на дне совершали круговые горизонтальные движения, и тогда на дне сковороды вы увидите рисунок пчелиных сот.

В заключение для самостоятельного анализа — еще один «сковородный» рисунок. Смажьте разогретую сковороду маслом, разлейте на нее тонким слоем тесто и понаблюдайте за дырочками, возникающими на поверхности. Не забудьте вовремя перевернуть и посмотрите на блин с обратной стороны.

Дороги, которые мы выбираем

Представим себе стекло аквариума, покрытое тонкой пленкой водорослей. По стеклу ползет «модельная улитка», соскабливающая и поедающая эту пленку. За ней остается полоска чистого стекла. Куда ползет улитка?

Выигрывают в конкуренции и продолжают существовать те организмы, которые наиболее активно поглощают ресурсы. Поэтому улитка должна двигаться в том направлении, где больше пищи. Это ее потенциал. Слой пищи на стеклах аквариума неравномерен, где-то он уже съеден другими улитками. Для улитки важны и факторы среды: температура воды, содержание кислорода, гарантированность от нападения хищников и т. п. Поэтому в итоге моллюск движется туда, где больше пищи, лучше условия и меньше опасность — туда, где выше суммарный потенциал жизнедеятельности. Если улитка не видит дальше собственного носа, то, наткнувшись на собственный или чужой след, она должна развернуться. При таком примитивном поведении следы, оставленные улиткой, в зависимости от особенностей потенциального рельефа при отсутствии микро- и макронеоднородностей будут похожи на структуры, изображенные на рис. 114—119. Чтобы выполнить такие рисунки, моллюск должен хорошо чувствовать градиент потенциала и уметь легко, без больших затрат энергии разворачиваться. В противном случае при тех же внешних условиях рисунки изменятся (ср. рис. 130 и 118).

Моллюск может оставлять два типа следов. Если слой пищи меньше порогового, при котором затраты энергии на ее сбор не компенсируются калорийностью нищи, то моллюск не кормится и оставляет лишь след передвижения. Этот след потенциал не разгружает. Как только потенциал превышает этот уровень, моллюск начинает кормиться и оставляет след поедания, разгружая в пределах следа потенциал, — появляется линия.

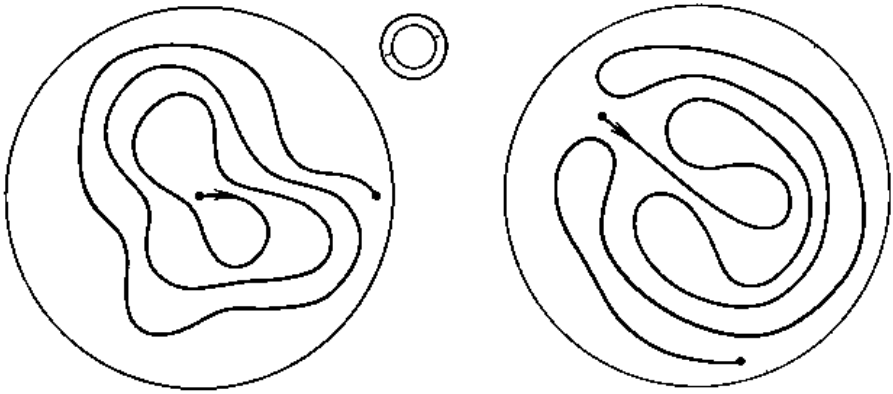


Рис. 130

Теперь представим себе человека, собирающего землянику. Допустим, в лесу он наткнулся на поляну, к центру которой количество ягоды увеличивается. Если человек в данный момент не имеет иных целей, кроме сбора ягод (как можно больше и быстрее), а вокруг много конкурентов, то, наткнувшись на поляну, он направится к ее центру, после чего, оставляя за собой выбранное пространство, по спирали будет отодвигаться к ее краю. В итоге, в зависимости от того, как человек двигался к центру поляны, собирая ягоды, — шагом или на корточках — на поляне останутся полосы сильно примятой травы, такие же, как на рис. 118.

Направление движения вершин трещин, складок определяется особенностями потенциала в непосредственной близости от вершины. Большинство же организмов «видят дальше». Поэтому направление их движения определяется значением потенциала в широком пространстве. Если улитка «видит» вдалеке область с высоким значением потенциала, то она направится туда, даже если прямо перед ней значения потенциала низкие. В этом случае, встретив свой след, она может его пересечь. Организм как бы интегрирует значения потенциала в различных направлениях и движется туда, где в сумме потенциал выше. В среднем при движении по этому пути величина разгрузки потенциала будет максимальна и соответственно максимально удовлетворены потребности. Потенциал жизнедеятельности может меняться во времени. Например, у животных активных в светлое время этот потенциал на территории вблизи убежища днем небольшой, но он резко возрастает здесь с приближением ночи.

Высшие организмы способны «смотреть вперед» не только в пространстве, но и во времени и соответственно интегрировать потенциал не только по направлению, но и по времени.

Например, хищник, «зная», что в каком-то районе возрастает (допустим, к полудню) плотность его жертв, может направиться туда, хотя в данный момент (утром) потенциал там небольшой. Или, преследуя убегающую жертву, он движется не к ней, а к той точке, где, по его «расчетам», жертва будет находиться в скором времени. Чем выше организовано существо, тем в большей степени его поведение в данный момент обусловлено будущим прогнозным состоянием потенциального поля и тем по большему отрезку времени он интегрирует различные варианты движения и поведения.

Потребности могут быть разнообразные. Например, что движет туристом в незнакомой местности? Как вариант — он собирает эстетическую информацию и соответственно идет в том направлении, в котором имеются интересные объекты. В обобщенном потенциале потребностей в данное время это главный компонент. Ближе к вечеру турист также движется от одного интересного объекта к другому, но в целом его потенциальное поле резко воздымается вблизи от оставленной утром палатки, и, выбирая между несколькими объектами, турист пойдет к тому, который к ней ближе.

А теперь представим, что местность ему знакома, — он «видит» все потенциальное поле. Оно существует в виде модели его сознания. Возможно, местность туристу незнакома, но у него есть карта, это тоже модель пространства. В этих случаях турист, проинтегрировав ряд вариантов движения, выберет такой маршрут, который максимально удовлетворит его потребности. Каждый из этих вариантов или их отдельные участки, пусть и мысленно, турист проходит по своей модели потенциального поля, двигаясь в направлении максимальных значений потенциала. Если он любит заглядывать далеко вперед, то маршрут первого дня он составит так, чтобы в походах и в следующие дни максимально удовлетворять свои потребности. В итоге, в потенциальном поле туриста, заранее выбравшего маршрут, будет задан высокий гребень, по которому он и будет двигаться. В пути может выясниться, что представления о местности были неточны или ошибочны (местность со времени издания карты могла измениться). Изменение потенциального поля скажется на маршруте, он отклонится от этого гребня, будет спланирован по-новому. Сильно изменить потенциальное поле потребностей может обычный дождь.

Потенциальное поле и его разгрузка могут быть индивидуальными (например, турист разгружает только свои потребности) или быть общими для многих организмов, как пленка водорослей для моллюсков.

В зоне разгрузки величина потенциала со временем может вновь восстановиться — на поляне созревает новая ягода, стекло покрывается новой пленкой водорослей, туристу вновь захотелось увидеть маленькое лесное озеро. Или такой вариант — в поисках жертвы хищник движется в направлении, в котором вероятность встречи с ней наиболее велика. Разгрузка потенциала в данном случае выражается в том, что там, где только что прошел хищник, жертва не была обнаружена и соответственно вероятность ее встречи минимальна. Но по прошествии какого-то времени вероятность их появления здесь опять возрастет (чем активнее в передвижении жертва, тем это время короче), и хищник вновь может идти этим следом. Так может возникнуть охотничья тропа.

След может не только разгружать потенциал, но и усиливать. Так, улитка разгружает лишь узкую полоску пищи, но за ней остается достаточно широкая полоса, в которой, «как выснилось», хищники отсутствуют. Поэтому, если первоначальные градиенты потенциала невелики, то улитка вдоль своего следа вернется назад — сформируется клубок следов. При таком поведении моллюска хищнику трудно обнаружить его но следу.

След меняет потенциальное поле не только того, кто его оставил. След одного организма привлекает организм противоположного пола. След жертвы усиливает потенциальное поле, которое управляет движением хищника.

Направление движения организмов может задаваться анизотропностью свойств потенциального поля. Например, при наличии ветра движение хищника, пользующегося обонянием, подчиняется его направлению; грибник выбирает такое направление движения, чтобы солнце светило сбоку; донному организму, имеющему удлиненную форму, при наличии сильного течения трудно двигаться поперек него, трудно удержаться на дне. Также анизотропна может быть зона разгрузки — если солнце светит справа, то грибник больше грибов соберет с левой стороны по ходу своего движения.

Сколь бы ни сложны были причины наших поступков, мы всегда движемся, потому что нас подталкивают желания, потребности, необходимость. Движемся же мы в реальном многомерном пространстве ресурсов и факторов. «Умножьте» количество ресурсов в каждой точке этого пространства на скаляр потребностей в этих ресурсах и вы получите субъективно-объективный потенциальный рельеф, по которому мы движемся. Мы идем по нему, выбирая самые высокие вершины и гребни, стараясь в максимальной степени снизить вокруг себя этот рельеф. В одних случаях мы снижаем только его субъективную составляющую, в других — и объективную.

Поведение организмов и, следовательно, следы жизнедеятельности всегда подчиняются существующему внешнему полю ресурсов и факторов. Но видеть или изучать все это поле и постоянно просчитывать варианты трудно. Перелетная птица не может «увидеть» тропики и не может рассчитать зимние температуры. Поэтому многие универсальные, проверенные естественным или социальным отбором варианты поведения, связанные с дальним предвидением, и модели пространства заложены в генетическую или школьную программу, задаются привычками, инструкциями.

Дороги в отличие от тропинок, как правило, первоначально возникают в модельном порогово-потенциальном поле (в сознании, на карте). Те, кто задают направление дороги, имеют представление об этом поле во всем пространстве, поэтому отдельные дороги сразу (еще в проекте) связывают конечные пункты. Во многих случаях дороги проектируются на перспективу и в их положении учитывается возможность появления в будущем других дорог. Дороги часто развиваются в сильно расчлененном порогово-потенциальном рельефе (горы, болота, существующие дороги, тропы) и соответственно прокладываются по гребням этого рельефа. Но чем на большую перспективу строится дорога, тем точнее она выдерживает генеральное направление и в меньшей степени подчиняется деталям современных рельефов.

В обобщенное значение потенциала дорог входит и обеспеченность территории, региона, страны необходимыми для них ресурсами. Строительство дороги начинается при достижении этой величиной порогового значения. Дорога в окружающем пространстве разгружает эти ресурсы — рабочих, технику и т. п., стягивает их к себе и этим исключает на время своего строительства заложение на примыкающей территории (а иногда и в целой стране) новых дорог. По мере роста потенциала территории происходит как заложение дорог новой генерации, так и «углубление» существующих — увеличение их пропускной способности (твердое покрытие на дороге появляется, когда грузопоток по ней превысит, или планируется, что превысит, некоторый пороговый уровень).

Дорога — это диссипативная структура, она поддерживается, ремонтируется за счет постоянных или периодических денежных, энергетических вливаний (потоков). Без этих потоков она деградирует. Если поток ослабевает, то и транспортная сеть деградирует, снижается ее пропускная способность, некоторые дороги исчезают (но на их месте в порогово-потенциальном рельефе остается гребень).

Транспортное потенциальное поле чаще всего анизотропно —

в каких-то направлениях потребность перевозок выше, в итоге возникает обычный полосчатый рисунок (Транссиб, БАМ). Дороги разгружают потребность в перевозках лишь в направлении, параллельном себе, поэтому субпараллельная система дорог при наращивании потенциала разбивается поперечными. Равнинные города (центр города) являются вершинами растущего конуса потенциального рельефа с радиально анизотропным полем. Поэтому каркас окружающей его транспортной структуры и заданный им рисунок улиц будет похож на рис. 131. По сути, это идеализированная схема улиц Москвы или Парижа. Отклонения от этой схемы связаны обычно с холмами и реками, рассекающими конус потенциального рельефа, или с тем, что дороги и улицы развивались в чьем-то модельном потенциальном поле.

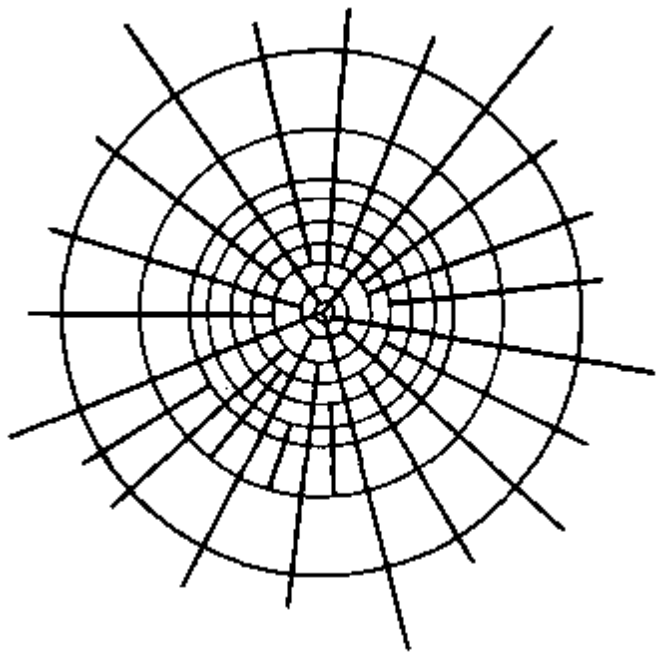


Рис. 131

Рис. 132

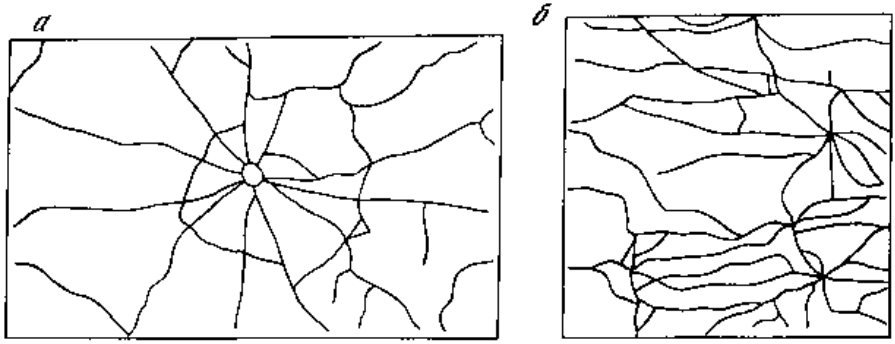


Рис. 133

Дороги разгружают потенциал в параллельном себе направлении, но одновременно с этим в их окружении потребность в перевозках обычно возрастает — дороги «притягивают» население, производства самоусиливают потенциал. Дороги — это подъездные пути для нового строительства, т. е. возле себя они снижают и порог. Поэтому сеть развивается в режиме ветвления — у дороги возникают притоки.

Развитие дорог и поселений (экономических узлов) тесно взаимосвязано, они взаимоусиливают свои потенциалы. Эти элементы и в моделях и в реальности зарождаются зачастую одновременно.

Развитие дорог в их потенциальном поле сходно с развитием трещин, потенциал они разгружают одинаково — преимущественно в параллельном себе направлении, поэтому при сходном потенциальном рельефе рисунки трещин должны быть похожи на транспортные структуры. Проведем такой эксперимент. Возьмем лист бумаги, покрытый тонким слоем стеарина, положим его на мягкое основание и сверху надавим шарообразным предметом диаметром порядка 10 см. На стеарине появится система трещин (рис. 132). Эти структуры развивались в радиально-анизотропном поле напряжений в режиме плавного наращивания значений потенциала. В таком же потенциальном поле развивается транспортная структура вокруг равнинных городов. Как видим, рисунок железных дорог вокруг Москвы (рис. 133, а) похож на рисунок трещин. Для сравнения посмотрим на рисунок центральносевероамериканских железных дорог, возникший в условиях преобладания субширотного транспортного потока (рис. 133, б) Отметим, что индикатриса потенциального поля, в котором развиваются дороги, может иметь форму восьмерки. В этом случае возможны остроугольные

сочленения.

Рассматривая рисунки трещин, мы анализировали ситуацию, когда трещина, выйдя из зоны с высокими значениями напряжений, стремится развернуться назад. Схожую ситуацию мы можем видеть на карте Московского метрополитена. Первоначально его рисунок появился в радиально-анизотропном поле, но со временем некоторые линии метро удлинялись, опережая расширение города, и их концы оказались у его границы. Поэтому они стали разворачиваться назад, туда, где потенциал (потребность в них) выше.

Каждый охотник желает знать

Из множества природных вариантов мы рассмотрели всего две схемы возникновения рисунков. В первой элементы появляются в точке касания потенциального рельефа пороговым, после чего в примыкающей области происходит разгрузка потенциала, и появление других элементов здесь исключается. Во втором варианте понятием порога мы не оперировали, а первоначальное появление линейных элементов задавалось. Развивались эти элементы в соответствии с потенциальным полем, разгружая его вокруг себя. Теперь рассмотрим вариант, когда элемент появляется при условии $E = P$, но разгрузка происходит лишь в точке касания, т. е. как только где-то выполняется условие $E = P$, тут же скачком в этой точке потенциальный рельеф обрушивается до нулевого уровня. Допустим, пороговый и потенциальный рельефы горизонтальны. В этом случае, как только выполнится условие $E = P$, на всем пространстве произойдет обрушение рельефа — разгрузка потенциала. Наше пространство можно раскрасить в зависимости от значений потенциала. Допустим, при $E = 0$ пространство белое, а при $E \to P$ оно плавно темнеет. Тогда только что описанный процесс будет выглядеть так: все пространство становится темнее и темнее, а затем разом белеет. Пространственной структуры не возникает. Если процесс наращивания потенциала задать непрерывным, то сразу после обрушения потенциальный рельеф вновь начнет воздыматься и через какое-то время опять выполнится условие $E = P$ — система будет находиться в колебательном режиме — чем выше скорость наращивания потенциала, тем выше частота колебаний.

Теперь зададим неоднородные условия — выпуклый потенциальный рельеф, например в виде конуса (чем ближе к вершине, тем темнее). В этом случае разгрузка потенциала произойдет в его вершине — здесь образуется кратер (белое пятно), а затем при дальнейшем воздымании и расширении этого поднятия область разгрузки (пятно) будет расширяться. Чем положе рельеф и чем быстрее он воздымается, тем выше скорость расширения. Одновременно с этим в разгруженной части пространства значения потенциала вновь будут наращиваться (центр пятна вновь начнет темнеть), и в какой-то момент в центре рассматриваемой области опять выполнится условие $E = P$ и т. д. В итоге возникнет структура из параллельных непрерывно расходящихся контрастных колец. Чем круче наклон первичного потенциального рельефа, тем меньше будет расстояние между

кольцами. На рис. 134 показана динамика развития этой структуры в одномерном варианте (в разрезе).

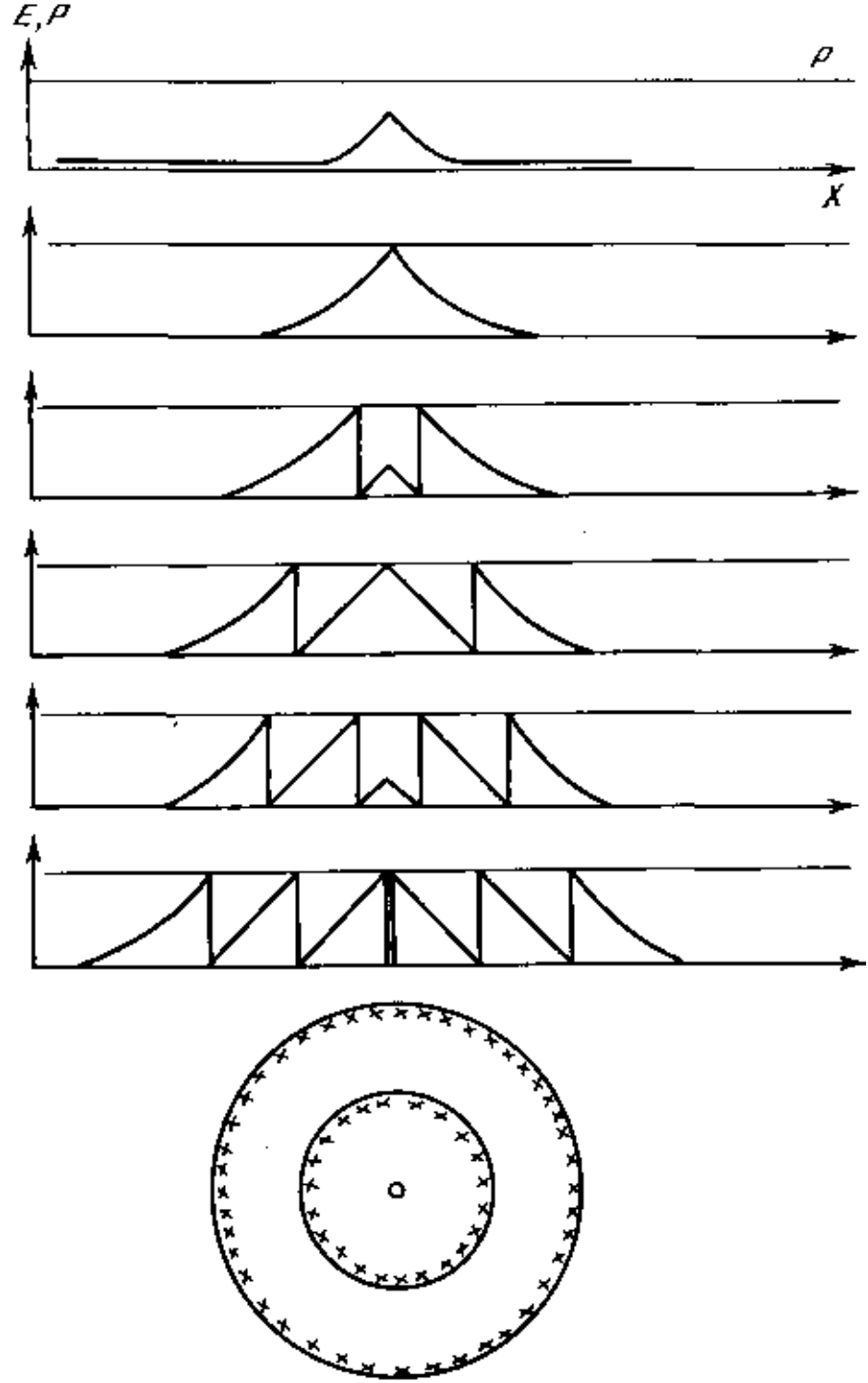


Рис. 134

Подобный механизм можно проиллюстрировать известным явлением возникновения структур при ветровом повале леса. В районах с частым повторением сильных ветров деревья, как только они достигнут определенной высоты, не выдерживают их напора. Такие леса развиваются в колебательном режиме — после ветроповала лес восстанавливается и, достигнув критической высоты, вновь гибнет. Если же условия произрастания деревьев неоднородны в пространстве, то лесной массив состоит из разновозрастных медленно смещающихся полос зеленых деревьев, разделенных бурыми полосами бурелома.

Близкий пример — образование расходящихся волн лишайников на камне. Пятно лишайника разрастается. Со временем его центральная (старая) часть отмирает и образуется расширяющееся кольцо, затем в его центре возникает новое пятно лишайника и т. д. По этой же схеме возникают грибные «ведьмины» кольца.

Теперь представим ситуацию, когда E может быть и больше и меньше P. При $E = P$ разгрузки потенциала не происходит, а меняется лишь качественное состояние территории, меняется ее «цвет». Если пороговый и потенциальный рельефы горизонтальны, то вся территория одновременно в момент достижения условия $E => P$ перейдет в новое качественное состояние — изменит цвет. Если же пороговый или потенциальный рельеф расчленен (рис. 135), то к какому-то моменту на отрезках ab и cd поверхность будет находиться в одном качественном состоянии, а на отрезке bc — в другом. Появилась простейшая структура. Пример из этой серии — возникновение водоемов. Поверхность становится обводненной, когда уровень грунтовых вод (E) превышает уровень земли (P). Контур голубых водоемов и в природе и на карте соответствует линии, на которой выполняется условие $E = P$.

Зададим несколько пороговых уровней и соответственно несколько качественных состояние $P_1 < P_2 < P_3$. Пусть состояние $P < P_1$ имеет желтый цвет, $P_1 < P < P_2$ — зеленый, $P_2 < P < P_3$ — салатный, $P_3 < P$ — белый. При горизонтальных рельефах (при равномерных условиях) вся область будет находиться в каком-то одном состоянии, пространственной структуры не будет. Если же задать наклонный потенциальный рельеф, например в виде конуса, в вершине которого $E > P_3$, то получим пространственную структуру, состоящую из вложенных цветных колец (рис. 136). А если этот конус рассечен пятью спускающимися с него глубокими лощинами, то мы получим рисунок из вписанных друг в друга цветных пятиконечных звезд. Простейший пример рисунков,

выполненных в такой манере, — высотная поясность. Как только высота (E) достигает уровня P_1 — желтые степи сменяются зеленым лесом, на уровне P_2 проходит граница между лесом и альпийскими лугами, а на уровне P_1 — граница белых вечных снегов.

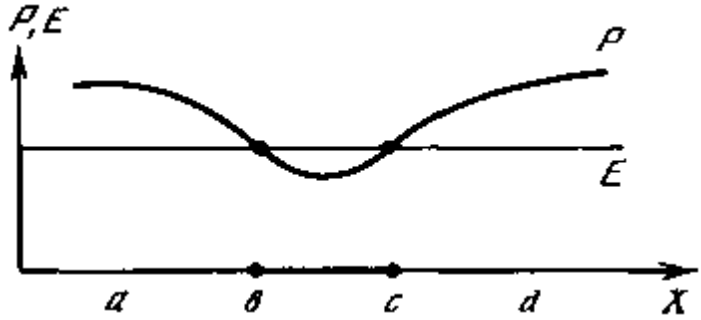


Рис. 135

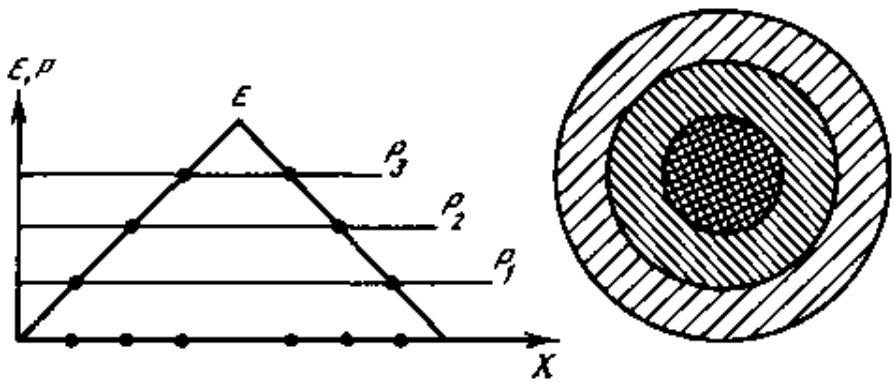


Рис. 136

Другой пример — цветные разводы на мыльном пузыре или на разползшемся по воде пятне от капли горючего. E в данном случае — толщина пленки, а уровни P задаются длиной световых волн, соответствующих цветам солнечного спектра. Если толщина пленки везде одинакова, то рисунок одноцветный. Если же она меняется, то появляется последовательное многоцветие. Как видим, наши E и P применимы не только для линий и точек.

Живые рисунки

Какую технику использует живая природа, когда создает свои рисунки и формы?

Развитие организмов подчиняется генетической программе, но вряд ли в ней заложены координаты всех атомов, всех клеток и органов организма. Это нерационально. У живой природы есть простые алгоритмы.

Популярные ныне гипотезы биологического морфогенеза, пытающиеся объяснить механизм возникновения рисунков, основаны на реакционно-диффузионных моделях, в которых пространственная структура получается из первоначально однородного состояния (заметим — опять однородное состояние). В этих моделях предполагается, что элемент структуры (волосок на коже или полоска на шкуре) выделяет какое-то химическое соединение (ингибитор), которое подавляет возникновение рядом новых элементов. Одновременно элемент выделяет и вещество активатор, которое стимулирует появление новых элементов. Из-за различий в скорости диффузии этих элементов на каком-то удалении активатор становится «сильнее», чем ингибитор, и рядом с первым появляются новые элементы и т. д. Мы такую ситуацию описали как самоорганизацию за счет разгрузки потенциала вблизи и снижения порога на небольшом удалении. Схема достаточно простая (правда, пока не найдены эти вещества). Но у природы есть и более простые варианты.

Совершим экскурсию в лес или парк. Присмотримся к рисункам на стволах деревьев. Проследить все стадии их создания просто. Когда-то толстый ствол был тоненькой веточкой, затем ветвью, стволиком. Поэтому, оглядывая ствол от основания до крайнего листочка, мы движемся по истории создания рисунка. Кора дерева по мере его роста растягивается, причем только в одном направлении — вдоль окружности ветки, ствола. Если кора пластичная, то она растягивается без разрывов, и со временем маленькие пупырышки, которые были на тонких ветвях, и округлые отметины на месте отмерших веточек растягиваются в горизонтальные штрихи и полосы. Если от ствола под острым углом вверх отходит ветка, то с годами по мере его утолщения, она будет им поглощаться, а на коре останется шрам в виде равнобедренного треугольника (рис. 137). Такие рисунки можно увидеть на молодых стволах березы и ольхи. Если же кора не растягивается, то со временем она покрывается множеством мелких субпараллельных вертикальных трещин (резко анизотропное поле). Ствол продолжает расти, и

эти трещины углубляются и расширяются. У некоторых деревьев фронт структурообразования хорошо выражен. Зародившись у комля, трещины год от года резким фронтом движутся вверх вдоль ствола. В итоге формируется четкий полосчатый рисунок. У некоторых деревьев граница структурообразования не выдержана, на стволе первоначально появляется множество мелких коротких трещин. В случае хрупкой коры трещины могут активно удлиняться в режиме взаимоконкуренции и тогда также возникает полосчатый рисунок. При вязкой коре первоначальные короткие трещины удлиняются мало, они больше расширяются, и их ширина со временем становится сравнима с длиной. Тогда из полосок коры, разделяющей трещины, возникает «плетенчатый» рисунок (рис. 138). У пальм нет тонких ветвей, их ствол наращивается от вершины. У некоторых видов это происходит путем причленения новых горизонтальных поясков, отделенных от предыдущего глубоким желобком. По мере расширения ствола этих пальм полоски коры между желобками разбиваются вертикальными трещинами, и в итоге возникает рисунок «кирпичной кладки».

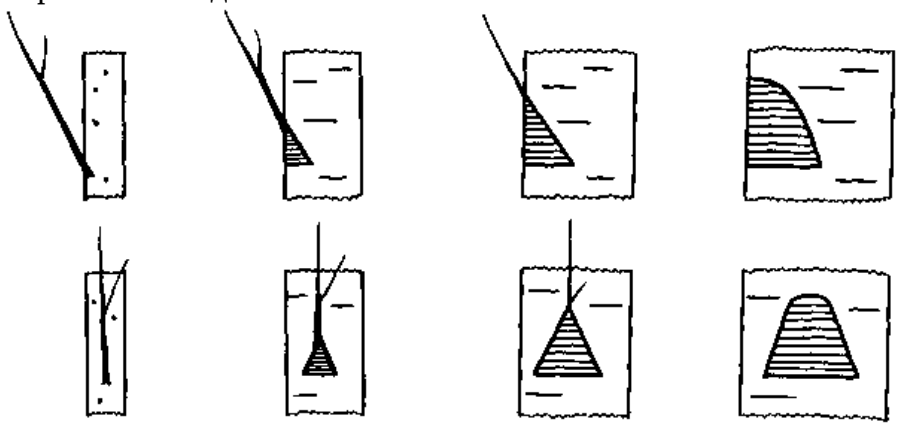


Рис. 137

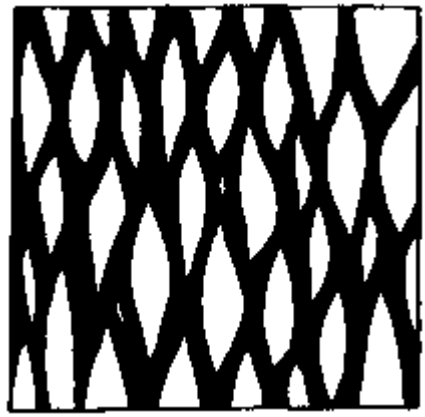


Рис. 138

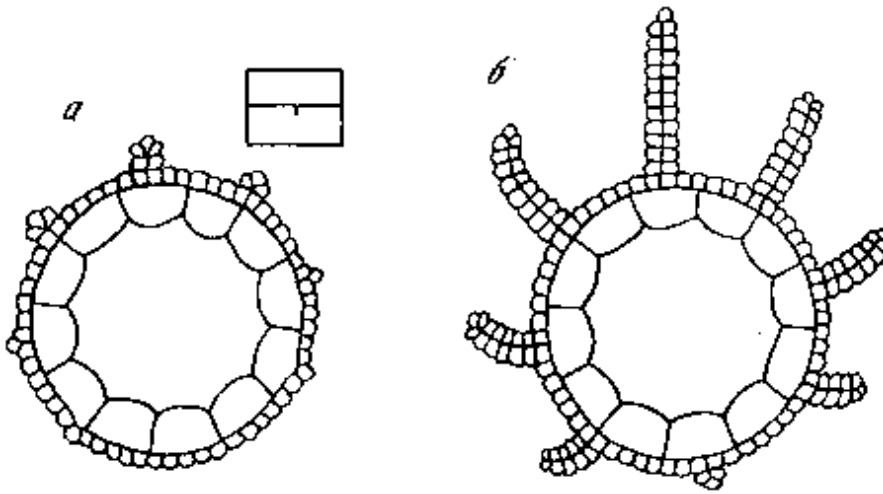


Рис. 139

Как видим, с рисунками на деревьях природа не мудрствует: рисунок — отражение полей растягивающих напряжений и прочности. Рисунок на кожуре спелой дыни или переспелого огурца — также обычные трещины: разбухая, плод растягивает и разрывает верхнюю жесткую оболочку. А морщины на коже — обычные складки, они соответствуют полям сжимающих напряжений.

Подобные механические деформации могут происходить и в живых тканях зародыша. Отдельные клеточные слои за счет активного деления клеток могут неравномерно растягивать другие слои и вызывать этим их разрыв и распад на отдельные фрагменты с закономерным размером. Если разбухающий за счет активного клеточного деления слой не может разорвать или растянуть примыкающие слои, то он сам изогнется складками

(рис. 139, а). Если этот слой наружный и окружен питательной средой, то клетки на вершинах этих складок будут активно делиться и сформируется лучевая структура (рис. 139, б), которая в дальнейшем может продолжать развиваться в режиме ветвления. Лучи будут вытягиваться в направлении преобладающих значений потенциала (например, наибольшей концентрации питательной среды).

Элементу самому можно ничего не выделять — ни ингибитора, ни активатора. Он лишь разгружает вокруг себя потенциал, например снижает напряжения или концентрацию каких-то необходимых для него химических веществ. Если есть градиент потенциала, то при его наращивании новые элементы будут возникать на границах этой области в точках его максимума. Наличие градиентов в организме — правило, общее наращивание значений различных характеристик по мере роста организма — также. При наличии пороговых уровней это достаточные условия для появления ритмичной пространственной структуры. Механизмов пространственной организации в природе может быть множество, но этот, как наиболее простой, наверно, используется наиболее часто.

Развитие кроны дерева, его корневой системы управляется внешним единым полем ресурсов (полем питательных веществ, солнечного света и т. п.). Но у разных пород деревьев форма кроны отличается. Она координируется внутренней программой. Программа может быть очень простой. В ней может быть задан угол и ритм ветвления (особенности зоны разгрузки) и поле (закон) распределения внутри растения питательных веществ, например «всем ветвям поровну» или «верхним больше». И в итоге рядом будут стоять раскидистый дуб и пирамидальный кипарис.

«Рельеф внутренних потенциальных полей», задающих развитие живой структуры, может определяться распределением температуры, концентрацией химических веществ в тканях, направлением их потоков, механическими напряжениями, удаленностью от каких-то функциональных узлов и т. д.

А теперь задумаемся над проблемой появления многообразия биологических форм и рисунков. Новые биологические виды появляются в результате мутации и отбора. Значит, и новые живые рисунки появляются в результате мутаций. Как происходит эволюция — плавно или скачками? Это зависит от объема информации, кодирующей организм. Если в ней записано положение каждой клеточки организма, то появление одной или двух ошибок в этой записи соответственно изменит положение лишь одной-двух клеток. В этом случае эволюция может быть

только плавной. Но то, что на первый взгляд кажется очень сложным, на самом деле может быть тривиальным.

Многим, наверно, известны задачи компьютерной графики, когда задается простейший алгоритм создания рисунка — две-три цифры, и в итоге на экране возникает рисунок бесконечной сложности и многообразия.

Информация о биологических формах также может быть записана «простыми формулами» — природа экономна. Ошибка в кратком алгоритме (мутация) кардинально изменит рисунок. Вспомните, что все множество приведенных выше абстрактных рисунков было получено путем последовательных небольших изменений порогово-потенциальной функции и часто конфигурация рисунка менялась кардинально.

Невидимые структуры

Е и Р применимы и для непространственных рисунков, которые можно нарисовать на бумаге, но нельзя увидеть в реальности. Вот пример подобной одномерной структуры. Представим, что появился новый сверхпрочный материал, и в промышленности возникла потребность в трубах различного диаметра из этого материала. Соответственно есть функция потребности от диаметра. Пусть ось x — это диаметр труб. Эта функция непрерывная — трубы нужны всякие, но один размер нужен больше, другой — меньше — потенциальная функция в какой-то точке имеет максимум, и как только этот максимум достигнет порогового уровня, определяемого технологическими и финансовыми возможностями, в этой точке на оси x появится элемент — труба диаметром x_1. Новое изделие разгрузит потребность в трубах не только этого диаметра, но и в своем окружении: трубу диаметром 2 см вполне можно использовать при потребности в трубах диаметром 1,8—2,2 — см, а иногда и в диапазоне 1—3 см. После появления первого размера в потенциальной функции на границах зоны ее разгрузки появятся два новых максимума. Дальнейший рост потребностей и технических возможностей в итоге приведет к возникновению упорядоченной одномерной структуры сортимента труб — цепочки точек вдоль оси x. Рост потребностей может привести к появлению второй генерации изделий. Схожие примеры — цепочки точек на оси радиочастот. Вдоль этой оси изменяется потенциал появления радиостанций. Появление элемента — мощной передающей радиостанции с фиксированной частотой — разгружает этот потенциал и исключает возникновение новой радиостанции рядом (на близких частотах). Другие примеры — номера охотничьих капканов, дроби, размер ячей рыболовных сетей.

Примером двухмерной точечной структуры может быть сортимент болтов. На координатных осях в данном случае могут быть отложены длина болтов и их диаметр. С началом производства первого (самого «ходового») болта с размером x_1 и y_1 потенциальный рельеф потребностей в болтах вокруг этой координатной точки разгружается. Следующий структурный элемент появится на новом максимуме потенциального рельефа на границе зоны разгрузки первого и т. д. В итоге возникнет точечная структура, разгрузившая область потребности в болтах. В зависимости от первоначальной конфигурации потенциального рельефа второй и последующие элементы (размеры болтов) могут

отличаться от первого длиной, или диаметром, или и длиной и диаметром. В итоге возможны различные варианты упаковки элементов и различная ориентация рисунка относительно осей координат. Например, если в порогово-потенциальном рельефе есть резкий гребень, параллельный координатной оси, вдоль которого изменяется диаметр, то вначале появится серия болтов, отличающихся лишь по длине[6]. У болтов помимо длины (x) и диаметра (y) могут быть и другие характеристики, например шаг резьбы. Соответственно, мы можем добавить еще одну координатную ось z. Тогда сортимент болтов будет уже трехмерной (объемной) структурой. Можно добавить и другие характеристики — прочность стали, размер головки. Такие многомерные структуры трудно представить и изобразить на бумаге, но схема описания процесса структурообразования не меняется — те же E и P функции, но уже многомерные и многомерная область разгрузки.

А теперь представьте такое пространство — на оси x ширина штанины мужских брюк в колене, а на оси y — внизу. В этом пространстве движется мода на брюки. Вспомним, что в 50-х годах модными были «клеша» — широкие и внизу, и в колене ($x > 30$ см, $y > 30$ см). Затем, в 60-годы мода резко сместилась к началу координат. Появились узкие «дудочки» ($x < 20$ см, $y < 20$ см). Затем точка моды поползла вдоль оси y — появились расклешенные брюки ($x = 20$ см, $y = 30$ см), а во второй половине 70-х развернулась и двинулась вдоль оси x к исходной точке — широким и внизу, и в колене. В 80-е годы мода сместилась вниз по оси y, уменьшилась ширина брюк внизу, появились брюки «бананы». Что движет модой? Куда она движется?

Двигают моду известные яркие личности, молодежь — люди, желающие выделиться, мода движется туда, где выше потенциал оригинальности, разгружая его за собой. По мере исчезновения из сундуков и из памяти фасона с координатами x_i, y_i потенциал оригинальности в этой точке накапливается, возрастает. Оригинально то, чего не было или давно не было. Мода движется, как голодная улитка в ограниченном пространстве, не отходя далеко от области физиологического и материального оптимума (брюки должны быть удобны и дешевы). Мода движется и скачет по гребням и вершинам созданного ею рельефа, постоянно его трансформируя.

E и P можно использовать в пространстве, включающем временную координату. Явления (элементы) разгружают потенциал не только вокруг, но и в будущем. Извержение вулкана (на оси времени элемент — не сам вулкан, а извержение)

разгружает потенциал (давление магмы) не только к северу и югу, но и на много лет вперед до того момента, когда давление магмы вновь достигнет критического уровня, в это время произойдет новое извержение. Так появляется временной ритм.

Время — специфичная координата. Вдоль нее структура событий всегда формируется в режиме сверхрезкой смещающейся границы структурообразования — события не могут забегать в будущее. Разгрузка потенциала на оси времени резко несимметрична — нельзя влиять на прошлое, можно влиять на описание прошлого в истории, менять ее структуру, но история не реальный объект, а его модель. Порогово-потенциальные рельефы вдоль оси времени испещрены множеством периодических гребней и насечек. Это определяемая космосом годовая, сезонная, суточная ритмика; множество насечек, связанных с праздниками и круглыми датами. Мы идем обедать, когда наше желание поесть достигнет порогового уровня, а он очень низок во время официального обеденного перерыва.

Порядок из хаоса?

Появление среди «ровного поля» рисунков, структур — загадка, породившая синергетику. Как появляется порядок, ориентация элементов, ритм? Как в мире, где все процессы сопровождаются ростом вселенского хаоса, возникает новая информация? Как мы можем ответить на эти вопросы сейчас, закрывая азбуку?

Рисунок складывается из элементов. Они же во всех рассмотренных нами примерах возникали на вершинах пороговопотенциального рельефа и развивались по его гребням. Элементы лишь повторяли, подчеркивали информацию, записанную в этом рельефе. Значит, вопрос надо поставить иначе — как появляются упорядоченные расчлененные рельефы? Эта расчлененность может быть внешне заданной, присутствовать изначально, но быть незаметной для глаза. И тогда возникнет ощущение, что порядок появился «на ровном месте». На самом же деле более контрастно проявился существующий порядок. А если первоначальный рельеф гладкий? Все равно у него есть максимум. В реальном мире не бывает однородных условий, на ровном месте заметна любая «пылинка». Максимум задает положение первого элемента. В системе есть информация, где он должен появиться. Если это линейный элемент, то его ориентация задана микроанизотропностью свойств в точке этого максимума. При появлении первого элемента этот максимум исчезает, проваливается и одновременно с этим на каком-то расстоянии неизбежно возникают новые максимумы (у любой функции должен быть максимум). От чего зависит это расстояние? От ширины зоны разгрузки, а она задана особенностями системы. Как видим, вся необходимая информация о рисунке присутствует в системе. Но присутствует в виде алгоритма его развития, и в этом случае элементы рисунка развиваются в соответствии с максимумами рельефа. И задаются эти максимумы самим рисунком, предыдущими элементами. Информация о местоположении и развитии передается от элемента к элементу. В этом и заключено таинство процесса формирования рисунка. Не надо ломать голову, как появился весь рисунок. Проблема сводится к единичному элементу, его место появления всегда определено, и как только появился этот элемент, он тут же закономерно изменяет потенциал и этим задает положение другого. Новая информация при этом не возникает, происходит лишь перезапись другим, более «ярким» языком информации и закономерностей, существующих в системе. Информация

высвечивается, становится более контрастной. Микромаксимум превращается в глубокий минимум. Первичная локальная анизотропность в вершине рельефа, задавшая направление первого элемента, после его заложения оборачивается противоположно ориентированной макроанизотропностью в широкой окружающей зоне.

А если упорядоченный рисунок возникает в результате перемещения первоначально неупорядоченных элементов? Направление смещения каждого из них в любой момент задано потенциальной функцией, элемент закономерно смещается в ту сторону, где потенциал выше. Это алгоритм развития рисунка, он задан законами термодинамики. Эти законы запрещают появление нового порядка из ничего, из хаоса. Новая структура — это лишь новое отображение существующего порядка.

Из нашей азбуки следует этот вывод. Но проницательный читатель тут же возразит: а живая природа, социум, сознание? Что, информация, заключенная в организме, государственной конституции, компьютере, присутствовала на Земле изначально? Не верится. Значит Бог? Может быть не верны законы термодинамики? Они верны, но применимы лишь для макрообъектов, а жизнь — это микроуровень.

Что такое слон? Судя но размеру, это бесспорно макрообъект. А по сути? В основе слона лежит хоть и макро-, но молекула. Слон это множество копий, снятых с одной и той же молекулярной матрицы ДНК. На молекулярном уровне законы термодинамики не работают и при копировании случайно, без всякой макрозакономерности возможно появление новой информации. А что такое компьютер? Это воплощение, макрокопия идей, родившихся в сознании. Клетки мозга — это тоже микроуровень. Лишь спустившись (поднявшись) сюда, можно обойти некоторые запреты термодинамики. Но об этом в другой азбуке.

notes

Примечания

1

Эта книга повторяет некоторые выводы, с которыми читатель может ознакомиться в работах: *Арманд А. Д.* Самоорганизация и саморегулирование географических систем. М.: Наука, 1988; *Чупрынин В. И.* Разрывные автоколебания в геофизических системах. М.: Наука, 1985.

2

Делль (от нем. Delle — углубление, впадина) — линейно вытянутая плоскодонная ложбина с зачаточным руслом. Служит для стока дождевых и талых вод.

3

Достовалов Б. Н., Кудрявцев В. А. Общее мерзлотоведение. М.: Изд-во МГУ, 1967. С. 156—157.

Там же. С. 157.

Определенное влияние на температурный режим, хотя и небольшое, может оказывать полигональный рельеф (например, в результате сдувания снега с валиков над жилой), но возникает этот рельеф через много лет после заложения сети первичных трещин, т. е. на рисунок это повлиять не может.

6

При описании структур, создаваемых человеком, мы задавали и анализировали гладкие порогово-потенциальные функции, но наш мир пронизывают принятые системы исчисления, повсюду мы видим ритм, кратный эталонам метра, дюйма, килограмма... Как это интерпретировать, через E и P? Это значит, что в порогово-потенциальных рельефах существует сетка насечек и узких гребней и в большинстве случаев условие $E = P$ выполняется в первую очередь на этой сетке.